



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**TEPELNÁ ANALÝZA SERVO MOTORU**

THERMAL ANALYSES OF SERVO MOTOR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Lukáš Kratochvila**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.**

**BRNO 2017**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Bc. Lukáš Kratochvila**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Tepelná analýza servo motoru

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je vytvořit tepelný model servo motoru zahrnující měření a verifikaci výpočtového modelu s měřeními. K tomu by mělo být využito metody konečných prvků. Tepelná analýza by měla zahrnovat vliv ložiska na tepelný stav motoru.

### Cíle diplomové práce:

1. Literární průzkum
2. Návrh tepelného modelu servo motoru
3. Realizace měření
4. Zhodnocení výsledků vyvození doporučení

### Seznam doporučené literatury:

Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraw Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.

Hak, J.; Ošlejšek, O.: Výpočet chlazení elektrických strojů. 1.díl. VUES Brno, 1973.

Ondruška, E.; Maloušek, A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha, 1985.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá tepelnou analýzou servomotorů pomocí výpočtového modelování metodou konečných prvků. Cílem bylo sestavení modelu pro analýzu, verifikace experimentem a hodnocení dosažených výsledků.

## **Klíčová slova**

Tepelná analýza, servomotor, metoda konečných prvků, výpočtové modelování, teplota, teplo, zkouška oteplení motor

## **Abstract**

This Master's thesis is focused on thermal analyses of servomotors per computational modeling with finite element method. The goal was to set the model for the analyses and verify it with experiment and evaluate achieved results.

## **Key words**

Thermal analyses, servomotor, finite element method, computational modeling, temperature, heat, motor heat test

## **Bibliografická citace**

KRATOCHVILA, L. *Tepelná analýza servo motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Tepelná analýza Servo motoru vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Doc. Ing. Radka Vlacha, Ph.D. Vycházel jsem z použitých pramenů a literatury uvedených v Seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 29. května 2017

.....

Jméno a příjmení

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Poděkování patří i mé rodině a přátelům za neustálou podporu během studia.

# 1 Obsah

Úvod.....	15
2 Analýza nestandardní situace .....	16
2.1 Formulace problému .....	16
2.2 Cíle řešení problému.....	16
3 Komplexní analýza problému.....	17
3.1 Servomotor.....	17
3.2 Chlazení.....	18
3.2.1 Samovolné chlazení .....	19
3.2.2 Vlastní chlazení.....	19
3.2.3 Cizí chlazení .....	19
4 Systém podstatných veličin .....	20
4.1 Teplota.....	20
4.1.1 Teplotní stupnice.....	20
4.1.2 Měření teploty.....	21
4.2 Teplo .....	22
4.2.1 Zachování energie kontrolního objemu .....	23
4.2.2 Přenos tepla vedením .....	24
4.2.3 Fourierův zákon .....	25
4.2.4 Přenos tepla prouděním .....	26
4.2.5 Newtonův zákon .....	27
4.2.6 Přenos tepla zářením .....	29
4.2.7 Stefan Boltzmanův zákon .....	29
4.3 Tepelná vodivost .....	30
4.4 Tepelná kapacita.....	30
4.4.1 Měrná tepelná kapacita .....	31
4.5 Tepelné odpory.....	32
4.6 Ztráty výkonu .....	35
4.6.1 Ztráty ve vinutí.....	36
4.6.2 Ztráty v magnetickém obvodu .....	37
4.6.3 Mechanické ztráty.....	37
5 Volba metod řešení problému .....	38
5.1 Metoda náhradní tepelné sítě (LPS).....	38
5.2 Metoda konečných prvků (MKP).....	38
6 Dosažené výsledky a verifikace .....	42
6.1 Servomotor 1 .....	42



6.1.1	Model geometrie .....	42
6.1.2	Síť a okrajové podmínky .....	43
6.1.3	Dosažené výsledky .....	50
6.1.4	Verifikace výpočtu.....	58
6.2	Servomotor 2.....	64
6.2.1	Model geometrie .....	64
6.2.2	Materiály .....	64
6.2.3	Síť a okrajové podmínky .....	64
6.2.4	Dosažené výsledky .....	70
6.2.5	Verifikace výpočtu.....	77
7	Závěr.....	83
8	Seznam použitých zdrojů: .....	84
9	Seznam použitých symbolů a zkratk: .....	86
10	Seznam obrázků a tabulek .....	90

## **Úvod**

Strojní součásti jsou ve většině případů projektovány s ohledem na mechanické namáhání. Ovšem přeměna energie na tepelnou je přítomna při naprosté většině procesů a teplotní pole má zejména v důsledku teplotní roztažnosti velký vliv na napjatost a deformaci, a to hlavně v podobě kontaktních tlaků nebo zbytkových napětí, proto jej nelze při návrhu strojních součástí zanedbávat.

Teplo může být v technických aplikacích, jako například metalurgie nebo energetika, žádoucí. Na druhé straně existují aplikace, kde je snaha o jeho eliminaci a odvod tepla dostatečným chlazením. Příkladem takovéto aplikace jsou elektrické točivé stroje, včetně servomotorů. Jejich návrh je omezen mezními teplotami, např. izolace vinutí, přeměnami tepla, resp. chlazením. Pomocí těchto veličin lze například optimalizovat výkon motoru.

## 2 Analýza nestandardní situace

Servomotory v potravinářském průmyslu musí splňovat přísná omezení, zejména omyvatelnost a eliminace míst, kde by se mohla vyskytovat nečistota a bakterie, včetně rovných povrchů a hlav šroubů. Proto je například Servomotor 2 výhradně v aplikacích otočen konektory směrem dolů a hlavy šroubů jsou zakrytovány. Bohužel tyto požadavky jdou proti klasické konstrukci elektromotoru se žebrováním, které zajišťuje lepší odvod tepla.

### 2.1 Formulace problému

Diplomová práce byla zadána firmou Kollmorgen na základě požadavků jejich zákazníka, který je v aplikaci pro potravinářský průmysl omezen teplotou a přeje si motor s co nejnižší teplotou povrchu. Na základě výše zmíněného byly vybrány dva typy servomotorů, které budou dále porovnány z hlediska teplotního pole. Firma do budoucna zvažuje nákup softwaru pro výpočtové modelování pomocí Metody konečných prvků. Z tohoto důvodu by měla práce zahrnovat řešení pomocí MKP.

### 2.2 Cíle řešení problému

Diplomová práce zadaná firmou Kollmorgen má za cíl:

- Vytvoření výpočtového modelu a následná analýza pomocí Metody konečných prvků.
- Porovnání dvou servomotorů z hlediska rozložení teplot při různých otáčkách.
- Verifikace experimentem.

### 3 Komplexní analýza problému

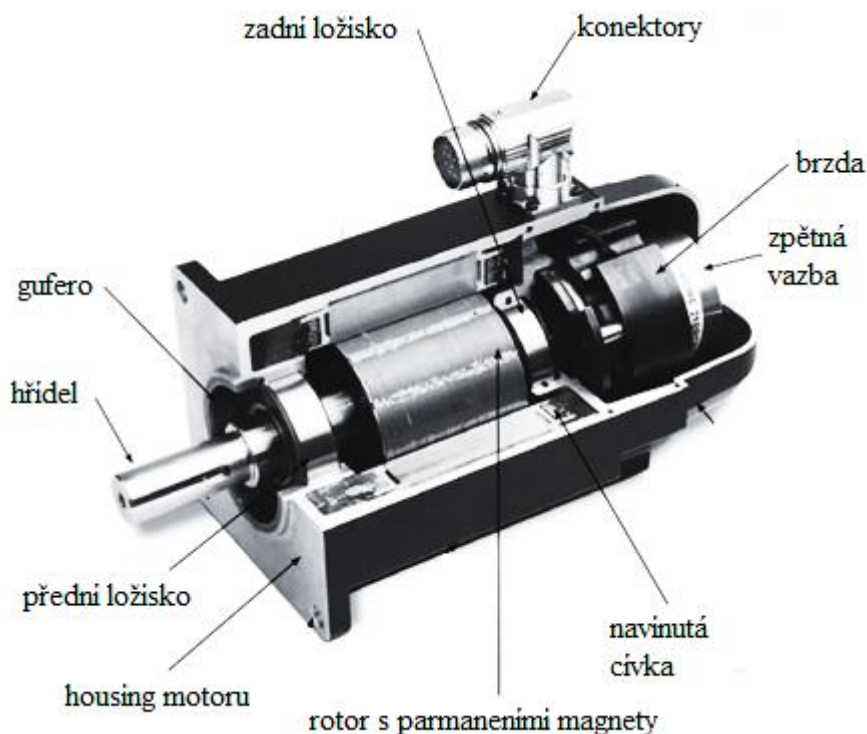
#### 3.1 Servomotor

Běžný elektrický pohon pracuje bez zpětné vazby, kdežto servopohon vždy pracuje v uzavřené regulační smyčce se zpětnou vazbou, která kontroluje přesnou polohu hřídele vůči nulové poloze, úhlovou rychlost a smysl otáčení. Mezi snímače polohy patří enkodér, resolver nebo např. Hallovy sondy. Což dává servopohonům dobré předpoklady pro regulaci a řízení. Hlavními aplikacemi jsou robotický průmysl, obráběcí stroje, manipulační a skladovací technika. [1]

Dělení servomotorů[1]:

- Stejnosměrné,
- Střídavé,
  - Synchronní s permanentními magnety,
  - Asynchronní s kotvou nakrátko.

Oba analyzované servomotory jsou střídavé, synchronní s permanentními magnety, u kterých je statorová část tvořena cívkou navinutou na plechové laminaci a rotorová část laminací s permanentními magnety. [1]



Obrázek 1 Konstrukce synchronního servomotoru s permanentními magnety [2]

Servomotor 1 splňuje pouze některé požadavky potravinářského průmyslu. Je vyroben z nerezové oceli. Vyjma příruby je konstrukce oproti běžným servomotorům kulatá. Stupeň krytí motoru je IP67. [2]



Obrázek 2 Servomotor 1

Servomotor 2 a splňuje nejprísnejší požiadavky na hygienický design podľa organizácie FMSA, drsnosti povrchů podľa EHEDG a 3A pre aplikácie do potravinárskeho priemyslu. Je kompletne vyroben z nerezovej ocele a výhradne z materiálov splňujúcich FDA požiadavky a má najvyšší stupeň krytí IP69K. Tento motor vydrží nepretržité mytie tlakovou vodou, vysoké teploty a omývanie veľmi agresívnymi chemikáliami. S týmto sa však nese cena motoru, ktorá je výrazne vyššia, než v prípade Servomotoru 1. [3]



Obrázek 3 Servomotor 2 [3]

Z dôvodu čiastočného utajenia nesmie byť typ motoru bližšie špecifikovaný.

### 3.2 Chlazení

Oteplení stroje závisí na systému chlazení, ktorý sa volí na základe zatížení a stupně krytí<sup>1</sup>. Zatížení je v podstatě časový průběh výkonu, ztrát a oteplení stroje.

---

<sup>1</sup> Stupeň krytí, též označovaný jako IP, znamená ochranu stroje proti vniknutí pevných těles nebo kapalin a zapisuje se pomocí dvou číslic, např.: nejvyšší stupeň krytí IP67 znamená, že zařízení je prachuvzdorné a vydrží 1,5m pod vodou po dobu 30 minut. [2]

Při delším provozu musí být umožněn přenos tepla z motoru, a proto jsou motory často vybaveny chladícím systémem. Ten je buďto přímý, kdy je chladivo přímo ve styku s plochou, kde se odvádí teplo, anebo nepřímý, kde je teplo odváděno přes více součástí. [4]

Dělení chlazení [4]:

- Samovolné,
- Vlastní,
- Cizí.

### 3.2.1 Samovolné chlazení

Tento způsob chlazení je nejjednodušší a využívá se u strojů bez ventilace. Teplo se přenesse především vedením a prouděním vzduchu do okolí, pokud to umožňuje prostorové uspořádání. Tepelná výměna proběhne na základě rozdílu teplot. [4]

### 3.2.2 Vlastní chlazení

O vlastní chlazení se jedná tehdy, pokud pohon ventilátoru zajišťuje elektromotor. Tento způsob chlazení se využívá zejména, pokud je motor ve stálém chodu. V případě vnitřního chlazení je ventilátor umístěn vevnitř motoru. Pokud je ventilátor vně motoru, jedná se o vnější chlazení. [4]

### 3.2.3 Cizí chlazení

U cizího chlazení má ventilátor svůj vlastní pohon a chlazení je řízeno nezávisle na otáčkách motoru. Tento způsob chlazení lze také použít s uzavřeným oběhem chladícího média, které obíhá v primárním okruhu. Tento okruh je chlazený chladičem. [4]



Obrázek 4 Rozdělení odvodu tepla elektromotoru [4]

## 4 Systém podstatných veličin

### 4.1 Teplota

Primárním způsobem, jak měřit tepelné procesy v soustavách je pomocí měření teploty. Teplota je stavová veličina a ovlivňuje, zda nastane proces přenosu tepla při rozdílných teplotách mezi látkami, či nenastane v důsledku stejných teplot látek. Teplota je stochastická veličina, avšak pro tepelnou analýzu bude uvažována jako deterministická.

#### 4.1.1 Teplotní stupnice

Pro měření teploty se používají různé stupnice [5]:

- Kelvinova stupnice,
- Celsiova stupnice,
- Fahrenheitova stupnice,
- Rankinova.

Kelvinova stupnice je dána absolutní nulou  $0K$  a teplotou trojného bodu vody  $273,16K$ . Stupnice souvisí s Carnotovou větou, která říká, že účinnost všech vratných cyklů Carnotových cyklů, které pracují mezi dvěma teplotami, je shodná a nezávislá na vnitřních, ani vnějších parametrech, např. teploměrové látky. [5]

$$\eta = \frac{|Q_2| - |Q_1|}{|Q_2|} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1)$$

kde:	$\eta$	$[-]$	Účinnost Carnotova cyklu
	$Q_1$	$[J]$	Teplo odevzdané chladiči
	$Q_2$	$[J]$	Teplo přijaté od ohříváče
	$T_1$	$[K]$	Teplota chladiče
	$T_2$	$[K]$	Teplota ohříváče

Z rovnice (2) vyplývá [5]:

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

kde:	$Q_1$	$[J]$	Teplo odevzdané chladiči
	$Q_2$	$[J]$	Teplo přijaté od ohříváče
	$T_1$	$[K]$	Teplota chladiče
	$T_2$	$[K]$	Teplota ohříváče

Celsiova stupnice je založena na teplotě tání ledu  $0^\circ C$  při tlaku  $101325Pa$  a teplotě varu vody  $100^\circ C$ , resp. rovnovážném stavu vody a její syté páry při tlaku  $101325Pa$ . Pro převod mezi Celsiovou a Kelvinovou stupnicí lze použít následující přepočty [5]:

$$T_C = T_K - 273.15 \quad (3)$$

kde:  $T_C$  [ $^{\circ}C$ ] Teplota ve stupních Celsia

$T_K$  [ $K$ ] Teplota v Kelvinech

Fahrenheitova stupnice je dána třemi body –  $0^{\circ}F$  eutektická<sup>2</sup> teplota směsi ledu se salmiakem,  $32^{\circ}F$  teplota tuhnutí vody a  $212^{\circ}F$  teplota varu vody. Pro převod mezi Fahrenheitovou a Celsiovou lze použít následující přepočít [5]:

$$T_F = \frac{9 \cdot T_C}{5} + 32 \quad (4)$$

kde:  $T_F$  [ $^{\circ}F$ ] Teplota ve stupních Fahrenheita

$T_C$  [ $^{\circ}C$ ] Teplota ve stupních Celsia

Pro převod mezi Fahrenheitovou a Kelvinovou lze použít následující přepočít [5]:

$$T_F = \frac{9 \cdot T_K}{5} - 459,67 \quad (5)$$

kde:  $T_F$  [ $^{\circ}F$ ] Teplota ve stupních Fahrenheita

$T_K$  [ $K$ ] Teplota v Kelvinech

Existují další stupnice teploty, avšak stupnice teploty nejsou předmětem této práce, proto nebudou dále rozebrány. [5]

#### 4.1.2 Měření teploty

Pro měření teploty existuje řada metod. Základní dělení je na kontaktní a bezkontaktní měření. Obě metody měření teplot mají své výhody a nevýhody. Volba metody měření teploty závisí na počtu měřených bodů, měřeném materiálu a rozsahu měřených teplot. [6]

Kontaktní snímače se upevňují přímo na měřený povrch. Jejich výhodou je nízká cena, jednoduché umístění, nezávislost měření a vysoká rychlost odezvy. Nelze s nimi měřit na pohyblivých částech strojů a měření je prováděno pouze bodově. [6]

Chyba měření může být způsobena uchycením senzoru na měřeném objektu. Veškeré lepicí hmoty a pásky zamezují odvod tepla, čímž vytváří nepřírozený stav v blízkém okolí měřeného objektu a zkresluje měření. Vhodnějším způsobem uchycení je přímo do měřeného objektu. Což je zejména v případě pevných objektů také zkresluje odvod tepla v důsledku úbytku materiálu. [6]

Dělení kontaktních metod měření teploty [6]:

- Termistory (odporové senzory) – využívají změny elektrického odporu materiálu, nejčastěji polovodiče, s teplotou,

<sup>2</sup> Eutektická teplota je nejvyšší teplota, při které je směs dvou látek tekutá, přičemž tyto látky jsou mísitelné v tekutém skupenství a v pevném nikoliv.



- Termočlánky – skládají se ze dvou vrstev odlišných materiálů a jsou založeny na Seebeckově jevu<sup>3</sup>, při kterém dochází k převodu tepelné energie na elektrickou,
- Indikátory – slouží k přibližnému zjištění teploty. Změna indikátoru nastane při dosažení kritické teploty.

U bezkontaktních snímačů se uplatňuje zejména přenos tepla radiací z povrchu stroje. Tato metoda se používá pouze pro měření teplot vnějších povrchů, neboť povrch, na kterém se měří teplota, musí být viditelný. Mezi výhody patří měření celých povrchů a bezpečnost při měření pohybujících se těles. Umožňuje měřit teploty od  $-40^{\circ}\text{C}$  až do řádu tisíců stupňů celsia. Nevýhodou této metody je závislost přesnosti měření na emisivitě povrchu, kterou je potřeba zohlednit. Měření může být ovlivněno teplotou okolí. Na lesklých površích dochází ke zkreslení měření v důsledku odrazu teploty. Tuto nevýhodu lze do jisté míry eliminovat kalibrací. [6]

Dělení bezkontaktních metod měření teploty [6]:

- Pyrometry – slouží k přibližnému zjištění teploty, ale fungují na poměrně velkou vzdálenost. Nepřesnost je dána vzdáleností měřeného objektu, nakloněním přístroje, emisivitou a obecně také prostředním.
- Termokamery – umožňují zobrazení celého teplotního pole povrchu objektu a následnou analýzu. Dělí se dále na analogové a digitální.

## 4.2 Teplo

Teplota a teplo jsou odlišné fyzikální veličiny. Teplo je forma energie, která nemůže vzniknout, ani zaniknout, pouze se přeměňuje na jinou formu energie. Teplota je důsledek přeměny energie. Teplo je stochastická veličina, avšak pro tepelnou analýzu bude uvažována jako deterministická.

Přeměna energie na tepelnou je přítomna při naprosté většině procesů. V jistých případech je teplo žádoucí, např. metalurgie. Naopak existují také aplikace, kde je potřeba teplo odvádět, např. chlazení motoru. Z hlediska řešení problému bude nejvíce nápomocna Termodynamika a její obor přenos tepla. Termodynamika se zabývá pouze koncovými stavy, nikoliv mechanismem, kterým došlo k přenosu tepla. Důležitý je zejména předpoklad, že soustava je v tepelné rovnováze s okolím,

Dělení přenosu tepla podle mechanismu:

- Vedení tepla (kondukce),
- Prouděním (konvekce),
- Záření (radiace).

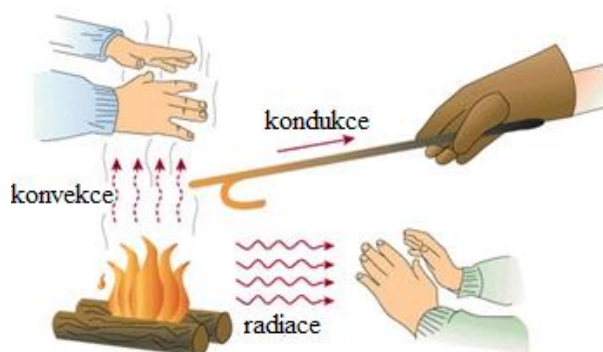
Přenos tepla lze také dělit na:

- Stacionární,
- Nestacionární.

U stacionárního není rozložení teploty závislé na čase a u nestacionárního přenosu tepla je naopak rozložení teploty závislé na čase.

---

<sup>3</sup> Mají-li dvě rozhraní, tvořená dvěma materiály, odlišnou teplotu, pak jsou také kontaktní napětí odlišná. Tato dvě rozhraní tvoří termočlánek, který má nenulové napětí a lze jej použít jako zdroj elektrického napětí.



Obrázek 5 Přenos tepla [7]

Teplo je dáno změnou vnitřní energie, která je rovna teplu odevzdanému od teplejšího tělesa chladnějšímu. Z hlediska mikrostruktury je příčinou vnitřní energie kinetická energie částic, které se v důsledku Brownova pohybu neustále a neuspořádaně pohybují. Teplo slouží k popisu změny termodynamického stavu, nikoliv stavu samotného. Při tomto procesu není uvažováno konání práce. K měření tepla se používá kalorimetr. [8]

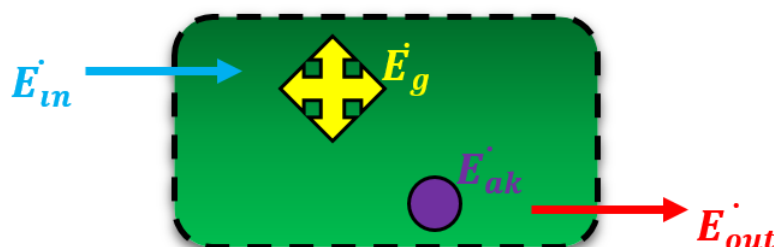
Pro teplo platí následující vztah [8]:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (6)$$

kde:	$Q$	[J]	Přeměněné teplo
	$m$	[kg]	Hmotnost
	$c$	$\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$	Měrná tepelná kapacita
	$\Delta T$	[K]	Rozdíl teplot

#### 4.2.1 Zachování energie kontrolního objemu

Aby došlo k přenosu tepla, musí mít těleso odlišnou teplotu než prostředí, ve kterém se nachází, nebo musí začít proces přeměny energie na tepelnou. Pokud nejsou tyto podmínky splněny, pak nedojde k přenosu tepla. Např. vodič je v tepelné rovnováze s okolím. Pokud však začne procházet proud, pak se vodič zahřeje. Jak rychle se těleso ohřeje, než dosáhne soustava rovnovážného stavu lze zjistit pomocí energetických bilancí. Pro popis energetických bilancí je stěžejní zavedení pojmu Kontrolní objem a Časovou základnu. [8]



Obrázek 6 Energie kontrolního objemu [8]

Kontrolní objem je oblast prostoru, kterou ohraničuje Kontrolní povrch a může jím procházet jak energie, tak látka. Kontrolní objem je fixován v prostoru. [8]

Časovou základnu lze definovat dvěma způsoby. V první definici je 1. zákon termodynamiky splněn v každém časovém okamžiku a je popsán přes bilanci změn toků energie. V každém okamžiku tedy musí být rovnováha mezi toky energie. [8]

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{ak} = \frac{dE_{ak}}{dt} \quad (7)$$

kde:	$\dot{E}_{in}$	[W]	Tok energie vstupující do Kontrolního objemu
	$\dot{E}_{out}$	[W]	Tok energie vystupující z Kontrolního objemu
	$\dot{E}_g$	[W]	Tok generované energie
	$\dot{E}_{ak}$	[W]	Akumulace

I v druhé definici Časové základy je splněn 1. zákon termodynamiky v každém okamžiku. Je popsán pomocí bilance tepla předaného mezi okolím a tělesem za časový úsek. [8]

$$E_{in} + E_g - E_{out} = E_{ak} \quad (8)$$

kde:	$E_{in}$	[J]	Energie vstupující do Kontrolního objemu
	$E_{out}$	[J]	Energie vystupující z Kontrolního objemu
	$E_g$	[J]	Generovaná energie
	$E_{ak}$	[J]	Akumulace

Toky energie vstupující a vystupující jsou veličiny povrchové, protože přímo úměrné Kontrolnímu povrchu a jsou spjaty s procesy, které se odehrávají na tomto povrchu. Nejčastěji se jedná o tepelné toky pomocí mechanismů vedení tepla, konvekce anebo radiace. Pokud přes Kontrolní povrch prochází látka, pak jsou tyto toky rovny energii, kterou tuto látka přenáší. Energie může mít podobu Potenciální, Tepelné nebo Kinetické energie a je v ní zahrnuta i práce. [8]

Generovaná energie je objemový jev, který zahrnuje rychlost přeměny energie (chemická, elektrická, elektromagnetická, jaderná, atd.) v energii tepelnou v Kontrolním objemu. Např.: Pokud prochází proud vodičem, pak se vodič díky svému odporu zahřeje, čímž dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou. Generovaná energie v Kontrolním objemu je rovna tzv. Joulovu teplu. [8]

Hodnota energie akumulované v Kontrolním objemu se označuje jako Akumulace. Pokud nejsou vstupující, vystupující a generovaná energie v rovnováze, pak se soustava ohřívá nebo ochlazuje právě v důsledku akumulace. Ohřev a chlazení se projeví nárůstem nebo poklesem energie akumulované v Kontrolním objemu. V ustáleném stavu platí, že Akumulace je rovna nule. [8]

#### 4.2.2 Přenos tepla vedením

Kondukcí je možné popsat jako proces přenosu energie od částic s vyšší energií k částicím s nižší energií. Energie je předávána po kvantech. Za částice lze považovat molekuly (u tekutin) nebo atomy (u tuhých látek). Tento přenos energie se uskutečňuje ve směru klesající teploty teplotního gradientu. [8]

### 4.2.3 Fourierův zákon

Fourierův zákon říká, že měrný tepelný tok  $\dot{q}$ , potažmo celkový tepelný tok  $\dot{Q}$ , který je vztažený na jednotku plochy, přenesen v látce kondukcí je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient. [8]

$$\dot{Q} = \int \dot{q} dS \quad (9)$$

kde:	$\dot{q}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Měrný tepelný tok
	$\dot{Q}$	$[W]$	Tepelný tok
	$S$	$[m^2]$	Plocha

Fourierův zákon pro obecný případ trojrozměrného vedení tepla v tělese je dán vztahem [1]:

$$\vec{\dot{q}} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (10)$$

kde:	$\dot{q}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Měrný tepelný tok
	$\lambda$	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	Tepelná vodivost
	$\text{grad}T$	$\left[\frac{K}{m}\right]$	Teplotní gradient

Tepelný tok je vektorová veličina, má tři složky a vždy se šíří ve směru normály k izotermě. [8]:

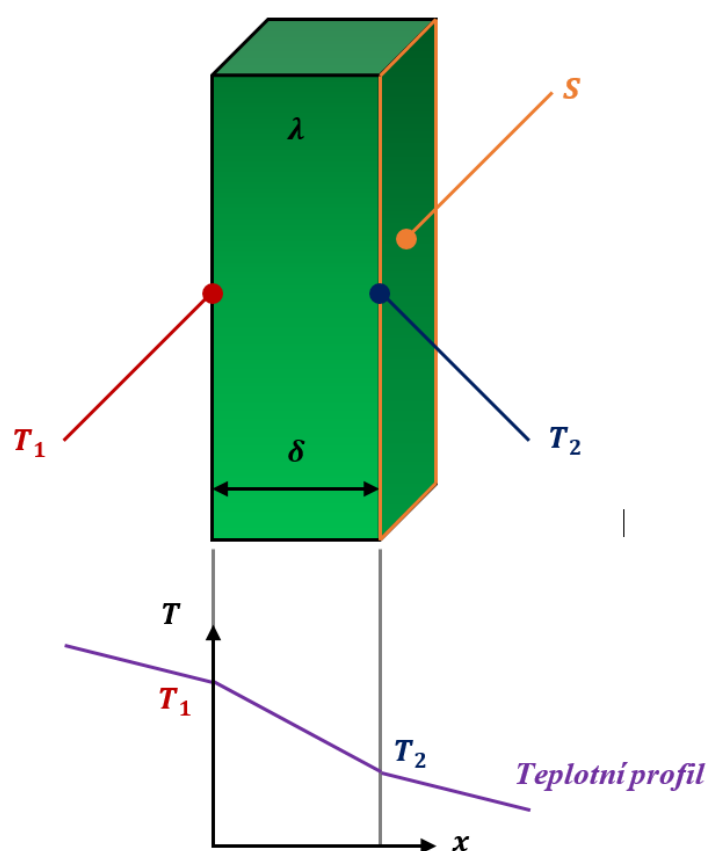
$$\dot{q}_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \dot{q}_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \dot{q}_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (11)$$

kde:	$\dot{q}_x; \dot{q}_y; \dot{q}_z$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Měrný tepelný tok
	$\lambda$	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	Tepelná vodivost
	$\frac{\partial T}{\partial x}; \frac{\partial T}{\partial y}; \frac{\partial T}{\partial z}$	$\left[\frac{K}{m}\right]$	Teplotní gradient

Pro jednorozměrné vedení tepla se vztah pro tepelný tok zjednoduší na skalární tvar [8]:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\frac{\delta}{\lambda \cdot S}} \quad (12)$$

kde:	$\dot{Q}$	[W]	Tepelný tok
	$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
	$\lambda$	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	Tepelná vodivost
	$\Delta T$	[K]	Teplotní rozdíl mezi krajními vrstvami
	$\delta$	[m]	Tloušťka mezi vrstvami



Obrázek 7 Jednorozměrné vedení tepla [8]

#### 4.2.4 Přenos tepla prouděním

Slovo konvekce vzniklo z názvů mechanismů, které hrají stěžejní roli při přenosu tepla prouděním. Jedná se o Kondukcii, která se uskutečňuje pomocí Difúze a Advekce, která označuje makroskopický tok tekutiny. Spojením těchto slov dostáváme slovo Konvekce. [8]

Mechanismus Difúze je dominantní v těsné blízkosti mezi povrchem tělesa a tekutinou, kde rychlost proudění tekutiny klesá až k nule a přenos tepla se uskutečňuje výhradně pomocí Kondukcce. [8]

Druhý mechanismus Advekce značí kolektivní pohyb velkého množství molekul v daném čase. Tento mechanismus způsobuje, že proud tekutiny je “strháván” směrem k povrchu, kde se vytváří tzv. Mezní vrstva, ve které se předává nebo odebírá teplo. [8]

Konvekce lze rozdělit na [8]:

- Nucená – pohyb látky nastává v důsledku vyvolaného rozdílu tlaků,
- Přirozená (volná),
- Kombinovaná.

Dále [8]:

- Konvekce při vnějším proudění, např. obtékání lopatek turbíny,
- Konvekce při vnitřním proudění, např. proudění uvnitř trubky.

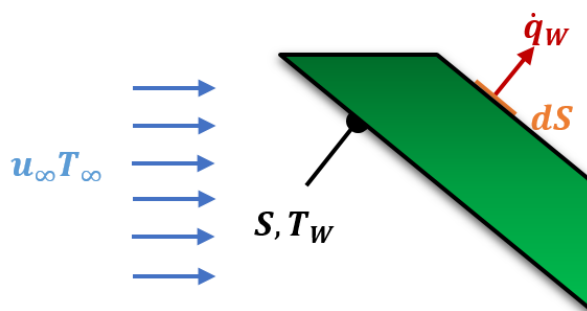
U konvekce při vnějším proudění se vždy objevuje tzv. mezní vrstva na obtékaném povrchu. Tento jev se neprojevuje u konvekce při vnitřním proudění. [8]

#### 4.2.5 Newtonův zákon

Přenos tepla konvekcí se řídí tzv. Newtonovým ochlazovacím zákonem [8]:

$$\dot{q} = \alpha_k \cdot (T_w - T_\infty) \quad (13)$$

kde:	$\dot{q}$	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	Měrný tepelný tok
	$\alpha_k$	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	Lokální součinitel přestupu tepla
	$T_w$	$[K]$	Teplota na povrchu tělesa
	$T_\infty$	$[K]$	Teplota tekutiny



Obrázek 8 Obtékání obecného tělesa tekutinou [8]

V případě přirozené konvekce lze pro součinitel přestupu tepla použít následující vztah [5]:

$$\alpha_k = C_k \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} \quad (14)$$

kde:	$\alpha_k$	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	Součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí
	$C_k$	$[-]$	Součinitel tvaru
	$T_w$	$[K]$	Teplota na povrchu tělesa
	$T_\infty$	$[K]$	Teplota tekutiny

Tabulka 1 Součinitel tvaru [5]:

Těleso	Omezující podmínky	Součinitel tvaru
<b>Vodorovný válec o průměru <math>D</math></b>	$D \leq 0,25m$	$C_k = \frac{1,315}{\sqrt[4]{D}}$
	$D > 0,25m$	$C_k = 1,05 + \frac{1,2}{\sqrt[4]{D}}$
<b>Svislé rovinné desky výšky <math>H</math></b>	$H \leq 0,3m$	$C_k = \frac{1,365}{\sqrt[4]{H}}$
	$H > 0,3m$	$C_k = 1,84$
<b>Rovinná čtvercová plocha o straně <math>L</math> chlazená směrem nahoru</b>	$L \leq 0,3m$	$C_k = \frac{1,315}{\sqrt[4]{L}}$
	$L > 0,3m$	$C_k = 1,78$
<b>Rovinná čtvercová plocha o straně <math>L</math> chlazená směrem dolů</b>	$L \leq 0,3m$	$C_k = \frac{0,59}{\sqrt[4]{L}}$
	$L > 0,3m$	$C_k = 0,8$

V případě nucené konvekce je potřeba pro součinitel přestupu tepla použít následující vztah založený na podobnostní teorii [5]:

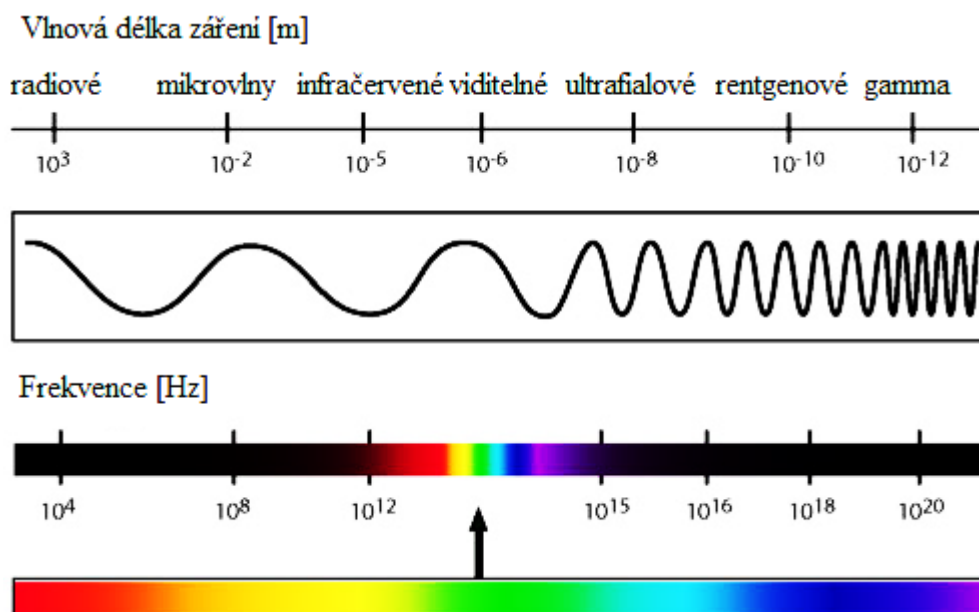
$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (15)$$

kde:	$\alpha_k$	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	Součinitel přestupu tepla nucenou konvekcí
	$Nu$	$[-]$	Nusselovo číslo
	$\lambda$	$\left[ \frac{W}{mK} \right]$	Tepelná vodivost
	$L$	$[m]$	Délka, např. chlazeného potrubí

Pozn.: Tvar a rozměry průřezu jsou zahrnuty v Nussellově čísle.

#### 4.2.6 Přenos tepla zářením

Zatímco u kondukce a konvekce zprostředkovává přenos tepla hmotná látka, v případě radiace není přítomnost látky nutná. Z tohoto důvodu může probíhat ve vesmíru, i v absolutním vakuu. Radiace je z mechanismů přenosu tepla ten nejsložitější. Vyzařování elektromagnetické energie probíhá na každém povrchu, který má vyšší teplotu než absolutní nula. (Z tohoto důvodu se pro popis záření užívá zásadně jednotky Kelvin.) Uvažujeme-li dvě tělesa, pak výsledný radiační tok závisí na tom, které tělesa vyzařuje více a také na charakteristice povrchu. Záření se vždy šíří rychlostí světla. Se zvyšující teplotou roste i vnitřní energie a záření má kratší vlnové délky. Vlnová délka tepelného záření leží v rozsahu od  $0,1\mu\text{m}$  do  $100\mu\text{m}$ . Tepelná energie se přenáší po kvantech. [8]



Obrázek 9 Rozsah vlnových délek elektromagnetického záření. [9]

#### 4.2.7 Stefan Boltzmanův zákon

Ideálním případem tepelného zářiče je tzv. černé těleso. Jeho záření je popsáno podle Stefan-Boltzmannova zákona. Tento zákon definuje celkovou zářivost neboli spektrální hustotu zářivého toku, v rozsahu vlnových délek od nuly od konečna [8]:

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (16)$$

kde:	$E_0$	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	Zářivost černého tělesa
	$\sigma$	$\left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$	Stefan-Boltzmannova konstanta
	$T$	$[K]$	Teplota tělesa

Černé těleso slouží k porovnání záření jiných povrchů. Oproti ostatním tělesům emituje nejvíce energie při stejné teplotě. Zářivost vztažená na jednotku vlnové délky se označuje jako tzv. monochromatická zářivost neboli emisivita. Poměr mezi monochromatickou



zářivostí nečerného a černého tělesa se označuje jako monochromatická poměrná zářivost a nabývá od nuly do jedné. [8]

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{0,\lambda}} \quad (17)$$

kde:	$\varepsilon_{\lambda}$	$[-]$	Monochromatická poměrná zářivost (emisivita)
	$E_{\lambda}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Monochromatická zářivost nečerného tělesa
	$E_{0,\lambda}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Monochromatická zářivost černého tělesa

Emisivita se může lišit pro stejné povrchy v závislosti na teplotě povrchu, vlnové délce tepelného záření, barvě a struktuře. Černé těleso má emisivitu rovnu 1. Pro šedé těleso platí, že emisivita je konstantní pro celý rozsah vlnových délek. [8]

Spojíme-li předchozí dva vztahy, získáme měrný tepelný tok radiací nečerného tělesa [5]:

$$\dot{q} = \varepsilon_{\lambda} \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_{\infty}^4) \quad (18)$$

kde:	$\dot{q}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Měrný tepelný tok
	$\varepsilon_{\lambda}$	$[-]$	Monochromatická poměrná zářivost (emisivita)
	$\sigma$	$\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$	Stefan-Boltzmannova konstanta
	$T_w$	$[K]$	Teplota na povrchu tělesa
	$T_{\infty}$	$[K]$	Teplota okolí

### 4.3 Tepelná vodivost

Jedná se o fyzikální veličinu, která vyjadřuje úměrnost mezi tepelným tokem a gradientem teploty ve Fourierově zákoně. Tepelné vodiče mají vysokou hodnotu tepelné vodivosti a naopak. Tato fyzikální veličina závisí na teplotě a má stochastický charakter. V analýze budeme uvažovat tuto veličinu jako deterministickou.

Materiály s vysokými hodnotami tepelné vodivosti jako měď a hliník se nejčastěji používají při návrhu zařízení, kde je potřeba právě vysoká tepelná vodivost.

### 4.4 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita vyjadřuje množství tepla potřebné pro změnu teploty. Čím vyšší hodnota tepelné kapacity, tím více tepla je potřeba k ohřevu materiálu. Tepelná kapacita je Stochastická veličina, avšak pro účely práce bude uvažována jako deterministická. [8]

$$C = \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (19)$$

kde:	$C$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita
	$\partial Q$	$[J]$	Elementární změna tepla
	$\partial T$	$[K]$	Elementární změna teploty

Z hlediska termomechaniky a především Prvního zákona termomechaniky je potřeba rozlišovat tepelnou kapacitu za konstantního tlaku  $c_p$  a konstantního objemu  $c_v$ . Vztah mezi nimi udává tzv. Mayerův vztah či Poissonova konstanta. [8]

$$C_p = C_v + R \quad (20)$$

kde:	$C_p$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita za konstantního tlaku
	$C_v$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita za konstantního objemu
	$R$	$\left[\frac{J}{mol \cdot K}\right]$	Univerzální plynová konstanta

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} \quad (21)$$

kde:	$\kappa$	$[-]$	Poissonova konstanta
	$C_p$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita za konstantního tlaku
	$C_v$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita za konstantního objemu

Z hlediska problematiky chlazení není potřeba rozlišovat tepelnou kapacitu při konstantním objemu a při konstantním tlaku. Toto rozlišení má smysl pouze pokud soustava koná tepelnou práci. Pro chlazení bude vždy uvažována tepelná kapacita při konstantním tlaku.

#### 4.4.1 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je tepelná kapacita vztažená na jednotku hmotnosti látky. Její hodnota závisí na teplotě. [8]

$$c = \frac{C}{m} \quad (22)$$

kde:	$c$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Měrná tepelná kapacita
	$C$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita

$m$  [kg] Hmotnost

#### 4.5 Tepelné odpory

V souvislosti s vedením tepla se v literatuře zavádí odpor proti vedení tepla. Tento vztah je založen na analogii s Ohmovým zákonem. [5]

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \quad (23)$$

kde:  $\dot{Q}$  [W] Tepelný tok  
 $\Delta T$  [K] Teplotní rozdíl mezi krajními vrstvami  
 $R_\lambda$   $\left[\frac{K}{W}\right]$  Odpor proti vedení tepla (reciproká hodnota tepelné vodivosti)

Např. pro jednorozměrné vedení tepla, které se používá pro vedení tepla skrz stěny, z rovnice (13) vypadá vztah pro tepelný odpor následovně [5]:

$$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda \cdot S} \quad (24)$$

kde:  $R_\lambda$   $\left[\frac{K}{W}\right]$  Odpor proti vedení tepla (reciproká hodnota tepelné vodivosti)  
 $\delta$  [m] Tloušťka mezi vrstvami  
 $S$  [m<sup>2</sup>] Plocha  
 $\lambda$   $\left[\frac{W}{mK}\right]$  Tepelná vodivost

Pokud je teplo vedeno přes více stěn za sebou, pak se odpory sčítají, obdobně, jako sériově řazené rezistory. [5]

Pro jednoduchou válcovou stěnu platí následující vztah [5]:

$$R_\lambda = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda \cdot 2\pi \cdot L} \quad (25)$$

kde:  $R_\lambda$   $\left[\frac{K}{W}\right]$  Odpor proti vedení tepla (reciproká hodnota tepelné vodivosti)  
 $r_1$  [m] Vnitřní poloměr válcové stěny  
 $r_2$  [m] Vnější poloměr válcové stěny  
 $\lambda$   $\left[\frac{W}{mK}\right]$  Tepelná vodivost  
 $L$  [m] Délka válcové stěny

Pro kulovou stěnu platí následující vztah [5]:

$$R_{\lambda} = \frac{r_2 - r_1}{\lambda \cdot 4\pi \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (26)$$

kde:	$R_{\lambda}$	$\left[\frac{K}{W}\right]$	Odpor proti vedení tepla (reciproká hodnota tepelné vodivosti)
	$r_1$	$[m]$	Vnitřní poloměr válcové stěny
	$r_2$	$[m]$	Vnější poloměr válcové stěny
	$\lambda$	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	Tepelná vodivost

Pro povrchový odpor při výpočtu konvekce i radiace platí vztah [5]:

$$R_{\lambda} = \frac{1}{\alpha \cdot S} \quad (27)$$

kde:	$R_{\lambda}$	$\left[\frac{K}{W}\right]$	Odpor proti vedení tepla (reciproká hodnota tepelné vodivosti)
	$\alpha$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	Lokální součinitel přestupu tepla
	$S$	$[m^2]$	Plocha proudění nebo radiace

Pro tepelný odpor proudu chladiva platí následující vztah [5]:

$$R_{\lambda} = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot Q} \quad (28)$$

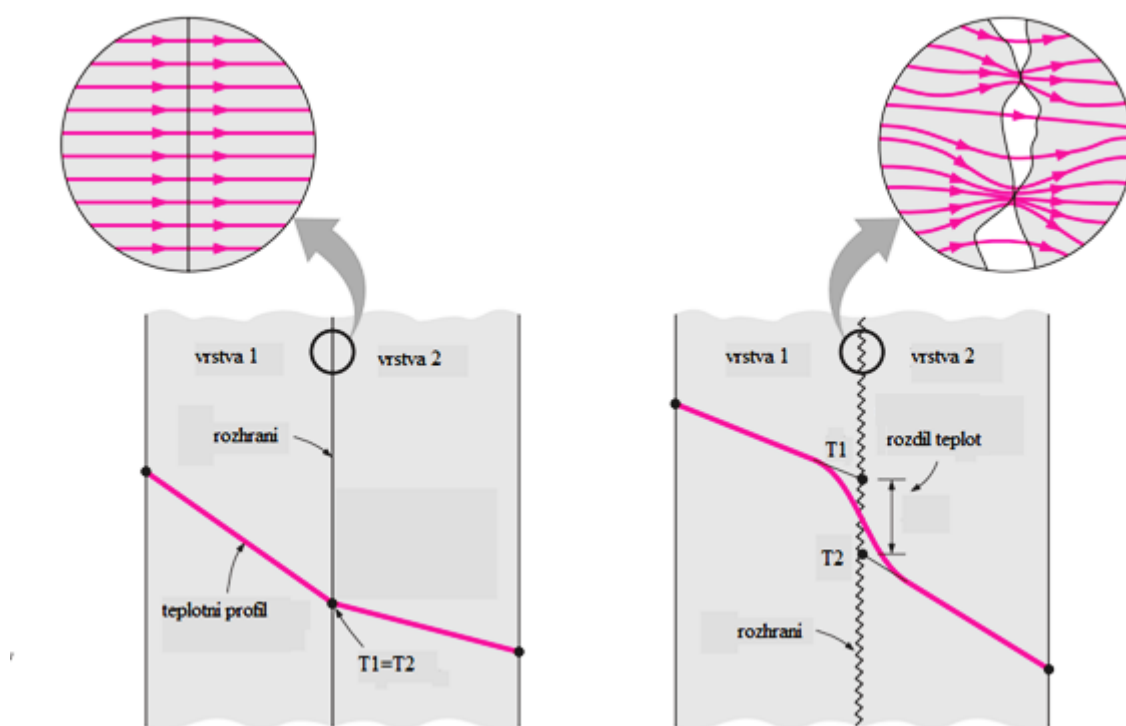
kde:	$R_{\lambda}$	$\left[\frac{K}{W}\right]$	Odpor proti vedení tepla (reciproká hodnota tepelné vodivosti)
	$\rho$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Hustota chladiva
	$c$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Měrná tepelná kapacita vztažené na objemovou jednotku vzduchu
	$Q$	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Průtok chladiva

Pro přestup tepla v kontaktu se spíše, než odpor používá Kontaktní tepelná vodivost. Tato veličina vychází z Newtonova zákona, viz rovnice 14. [5]

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{(T_w - T_\infty)} \quad (29)$$

kde:	$\alpha$	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	Lokální součinitel přestupu tepla
	$\dot{q}$	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	Měrný tepelný tok
	$T_w$	$[K]$	Teplota na povrchu tělesa
	$T_\infty$	$[K]$	Teplota tekutiny

Stanovit kontaktní tepelnou vodivost je velmi obtížné. Je způsoben nedokonalým stykem na rozhraní dvou materiálů. Tato veličina závisí na materiálech v kontaktu, drsnosti povrchů, kontaktním tlaku a teplotách obou těles. [5]



Obrázek 10 Kontaktní tepelná vodivost [5]

V následující tabulce je přehled nejběžnějších materiálů dostupných v literatuře.

Tabulka 2 Kontaktní tepelná vodivost dvou stejných materiálů [5]:

Materiál	Drsnost povrchu	teplota	Kontaktní tlak	Kontaktní tepelná vodivost
	$[\mu m]$	$[^{\circ}C]$	$[MPa]$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
AISI 416 nerezová ocel	2,5	90-200	0,2-2,5	3800
AISI 304 nerezová ocel	1,1	20	4,0-7,0	1900
Hliník	2,5	150	1,2-2,5	11400
Měď	1,3	20	1,2-20,0	143000
	3,8	20	1,0-5,0	55500
	0,3	30	0,2-7,0	11400

Tabulka 3 Kontaktní tepelná vodivost dvou odlišných materiálů [5]:

Materiál 1	Materiál 2	Drsnost povrchu	teplota	Kontaktní tlak	Kontaktní tepelná vodivost
		$[\mu m]$	$[^{\circ}C]$	$[MPa]$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
Nerezová ocel	Hliník	20,0-30,0	20	10	2900
				20	3600
Nerezová ocel	Hliník	1,0-2,0	20	10	16400
				20	20800
Hliník	Konstrukční ocel	1,4-2,0	20	10	50000
				15-35	59000
Hliník	Konstrukční ocel	4,5-7,2	20	10	4800
				30	8300
Měď	Hliník	1,2-1,4	20	5	42000
				15	56000
Měď	Hliník	4,4-4,5	20	10	12000
				20-35	22000

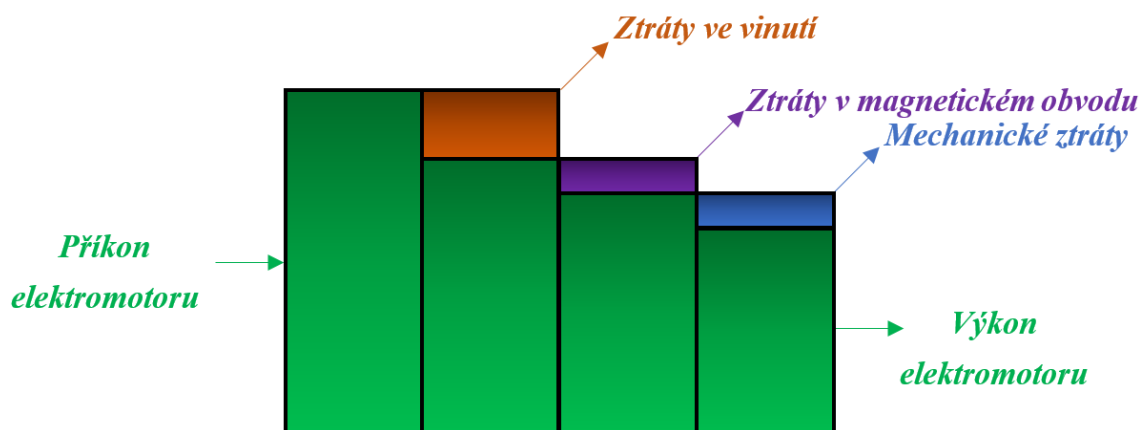
#### 4.6 Ztráty výkonu

Elektromotor při své činnosti odebírá ze sítě potřebný příkon. Výsledný mechanický výkon elektromotoru na konci hřídele je však nižší v důsledku ztrát výkonu. Pro celkovou účinnost stroje a životnost izolace jsou ztráty nežádoucí a při návrhu je snaha tyto ztráty minimalizovat a teplo odvádět až na povrch, odkud je elektromotor chlazen. Limitujícím faktorem jsou také mezní teploty, např. teplota vinutí.

Pokud je elektrický stroj zatížen konstantně, tak po uplynutí dostatečné doby nastane tzv. rovnovážný tepelný stav, kdy teplo generované strojem je rovno teplu odváděnému do okolí. Ztráty výkonu jsou stochastická veličina, avšak pro tepelnou analýzu bude uvažována jako deterministická.

Přeměna energie na teplo probíhá v elektrických strojích převážně v důsledku ztrát v elektromagnetických materiálech. Tyto ztráty lze rozdělit na ztráty ve vinutí, ztráty v magnetickém obvodu a mechanické ztráty. Součet ztrát tvoří rozdíl mezi příkonem stroje a výsledným mechanickým výkonem na konci hřídele.

Při rozběhu, brždění a změně zátěže elektromotoru jsou ztráty vyšší, v důsledku překročení jmenovitých hodnot ve vinutí. Při překročení mezních teplot dojde ke snížení životnosti až poškození izolace. Pokud je překročena teplotní roztažnost, může dojít ke změně vzduchové mezery, která má také vliv na výkon motoru. Z výše zmíněných důvodů vyplývá, že v uzavřených strojích je nutné odvádět teplo. [10]



Obrázek 11 Tok výkonu elektromotoru [9]

#### 4.6.1 Ztráty ve vinutí

Ztráty ve vinutí tvoří většinu celkových ztrát elektromotoru. Ztráty ve vinutí jsou závislé především na proudu a to kvadraticky. Jsou zapříčiněny průchodem proudu vodičem, zpravidla měděným, o určitém odporu. Právě odpor tohoto vodiče způsobí ztráty energie, které se mění na teplo. [10]

$$\Delta P_{Cu} = I_{ef}^2 \cdot R_a \quad (30)$$

kde:	$\Delta P_{Cu}$	[W]	Ztráty ve vinutí
	$I_{ef}$	[A]	Efektivní hodnota proudu
	$R_a$	[Ω]	Odpor vinutí

Chceme-li do ztrát ve vinutí zahrnout vliv teploty, je nutné odpor vinutí rozšířit dle následující rovnice [10]:

$$R_a = R_0 \cdot [1 + \varepsilon_0 \cdot (T - T_a)] \quad (31)$$

kde:	$R_a$	[Ω]	Odpor vinutí
------	-------	-----	--------------

$R_0$	$[\Omega]$	Odpor vinutí při teplotě $T_a$
$\varepsilon_0$	$\left[\frac{\Omega}{K}\right]$	Teplotní součinitel elektrického odporu
$T$	$[K]$	Teplota, ve které se vinutí nachází
$T_a$	$[K]$	Teplota, při které byl určen odpor $R_0$

#### 4.6.2 Ztráty v magnetickém obvodu

Tyto ztráty se také označují “Ztráty v železe” nebo “Ztráty v plechu” a dále dělí na ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. [10]

Hysterezní ztráty jsou způsobeny změnami magnetické indukce a lze je ovlivnit především fyzickými vlastnostmi magnetického obvodu složeného z plechových laminací. Ztráty vířivými proudy nastávají, pokud se magnetické siločáry uzavírají uvnitř magnetický obvod v důsledku vířivých proudů. Tyto proudy jsou indukované změnou magnetického toku v magnetickém obvodě. [10]

Pro výpočet magnetických ztrát je vhodné použít Steinmetzův vztah, který zahrnuje, jak ztráty vířivými proudy, tak ztráty hysterezní. Tento vzorec vyjadřuje měrné ztráty na jednotku hmotnosti. [11]

$$\Delta p_{Fe} = C_h \cdot f \cdot B^{a+b \cdot B} + C_e \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (32)$$

kde:	$\Delta p_{Fe}$	$\left[\frac{W}{kg}\right]$	Měrné magnetické ztráty
	$C_h$	$[-]$	Koeficient pro hysterezní ztráty
	$C_e$	$[-]$	Koeficient pro ztráty vířivými proudy
	$B$	$[T]$	Magnetická indukce
	$f$	$[Hz]$	Frekvence elektromagnetického pole
	$a$	$[-]$	Exponent hysterezních ztrát
	$b$	$[-]$	Exponent hysterezních ztrát

#### 4.6.3 Mechanické ztráty

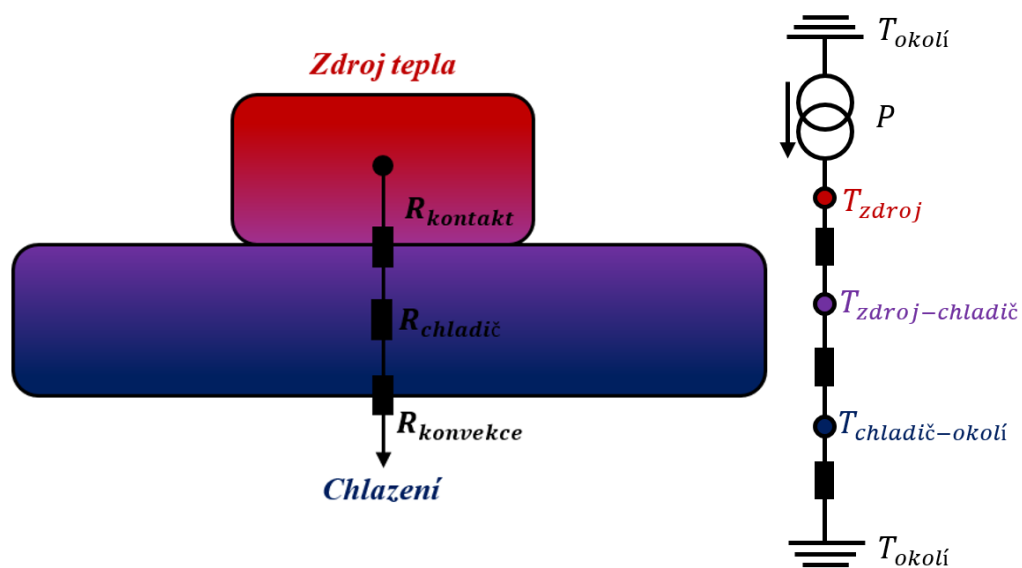
Nejmenší položku v celkových ztrátách tvoří mechanické ztráty, avšak pro tepelnou analýzu nejsou zanedbatelné. Patří sem zejména ztráty třením v ložiscích, odpor vzduchu ve vzduchové mezeře a ztráty prouděním vzduchu od ventilátoru. [11]



## 5 Volba metod řešení problému

### 5.1 Metoda náhradní tepelné sítě (LPS)

Metoda náhradní tepelné sítě neboli Lumped parametres system je založena na analogii mezi elektrickou energií a tepelnou. Tělesa jsou modelována jako tepelné odpory, viz kapitola 4.4 a v uzlech platí, že celkový tepelný tok vtékající do uzlu je roven celkovému tepelnému toku z uzlu vytékajícího, resp. analogie s Prvním Kirchhoffovým zákonem. Další rovnice jsou sestaveny na základě analogie s druhým Kirchhoffovým zákonem, kde vystupují zdroje tepla, tepelné odpory, namísto rezistorů a teploty namísto proudů. S využitím fyzikální analogie lze pomocí této metody modelovat i úlohy hydromechaniky, dynamiky a pružnosti a pevnosti. [5]



Obrázek 12 Schéma řešení pomocí metody LPS

Tato metoda je vhodná pro sestavy, které se skládají z malého počtu komponent, např.: chlazení výkonové elektroniky, počítače, apod. Při vyšším počtu komponent je vhodnější použít Metodu konečných prvků.

### 5.2 Metoda konečných prvků (MKP)

MKP je numerická metoda, která umožňuje analyzovat soustavy z hlediska zákonů fyziky. Počátek této metody se datuje do roku 1956. V současné době je nejvíce rozvinuta statická analýza, avšak pomocí MKP lze řešit také problémy dynamiky, tepelných procesů a elektromagnetismu.

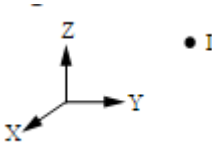

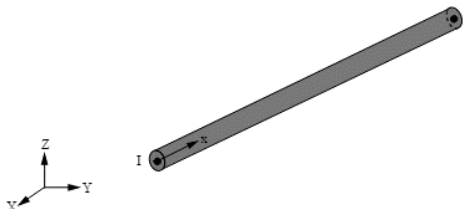

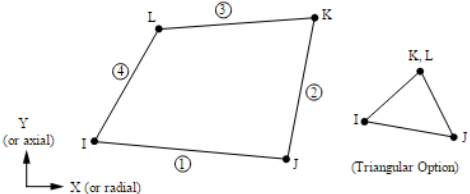
Deformační varianta MKP je odvozena z Lagrangeova variačního principu, který říká, že mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udílejí celkové potenciální energii  $\Pi$  stacionární hodnotu. Lze dokázat, že tato stacionární hodnota existuje, je jednoznačná a představuje minimum. [13]

$$\Pi = W - P \quad (33)$$

kde:	$\Pi$	[J]	Celková potenciální energie
	$W$	[J]	Energie napjatosti
	$P$	[J]	Potenciál vnějšího zatížení

Základním principem MKP je modelování spojitého kontinua pomocí prvků neboli diskretizace. Tu lze provést pomocí hmotného bodu, přímkových, rovinných nebo prostorových prvků. Při volbě prvků je potřeba zohlednit hardware výpočetní techniky, požadovanou přesnost výpočtu, časovou náročnost. Přehled základních prvků je v následující tabulce. [14]

Tabulka 4 Přehled prvků pro tepelnou analýzu. [14]:

Označení prvků v systému ANSYS	Použití prvku	Ilustrace
MASS71	<ul style="list-style-type: none"> <li>Model hmotného s danou tepelnou kapacitou</li> <li>bez tepelných gradientů</li> <li>např.: zdroj tepla.</li> </ul>	
LINK31	<ul style="list-style-type: none"> <li>1D radiace mezi dvěma uzly</li> <li>teplotu přenáší pouze axiálně</li> </ul>	
LINK33	<ul style="list-style-type: none"> <li>1D kondukce mezi dvěma uzly</li> <li>teplotu přenáší pouze axiálně</li> </ul>	
LINK34	<ul style="list-style-type: none"> <li>1D konvekce mezi dvěma uzly</li> <li>teplotu přenáší pouze axiálně</li> </ul>	
PLANE55	<ul style="list-style-type: none"> <li>2D prvky s lineární bázovou funkcí</li> <li>rovinné a axisymetrické úlohy.</li> </ul>	



Při řešení statických úloh pracuje MKP se základní rovnicí  $F = K \cdot U$ . Při tepelné analýze řeší obdobně následující rovnici [14]:

$$Q = K \cdot T \quad (34)$$

kde:	$Q$	$[W]$	Vektor tepelného toku
	$K$	$\left[\frac{W}{K}\right]$	Matice materiálových konstant nebo funkce teploty (zahrnuje tepelnou vodivost)
	$T$	$[K]$	Vektor teplot

Rovnice je pouze jiným zápisem Fourierova zákona z rovnice (11). Obdobně, jako u vztahu pro tepelný odpor viz kapitola 4.5 je i zde nápadná fyzikální analogie, kde je namísto vektoru posuvů  $U$  jako potenciálové veličiny použito teploty  $T$ . A namísto průtokové veličiny  $F$  je použit tepelný tok  $Q$ .

Řešitel musí sám zvážit, jak bude časově náročné řešit sestavu pomocí MKP nebo LPS. V případě servomotoru je sestavení tepelné sítě a příprava modelu pro výpočet méně náročná a měla by poskytnout přesnější výsledky.

## 6 Dosažené výsledky a verifikace

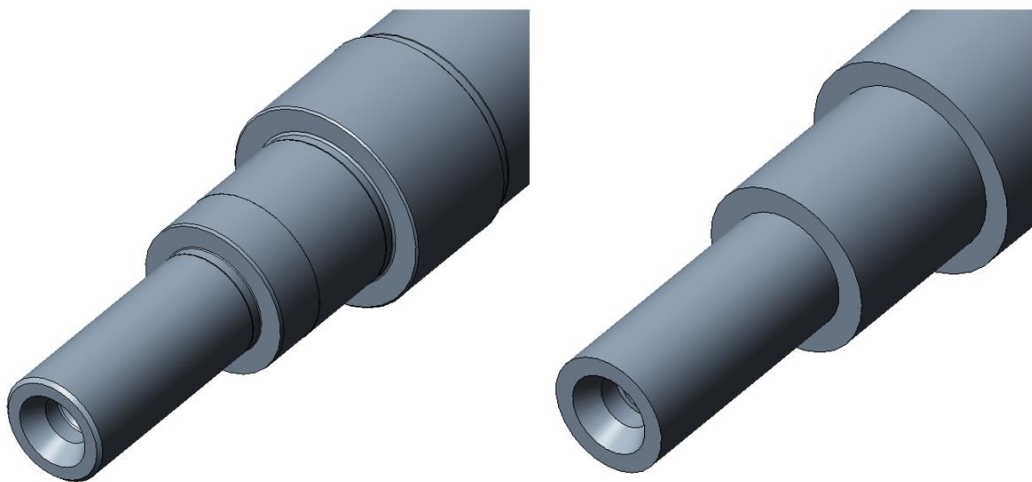
### 6.1 Servomotor 1

#### 6.1.1 Model geometrie

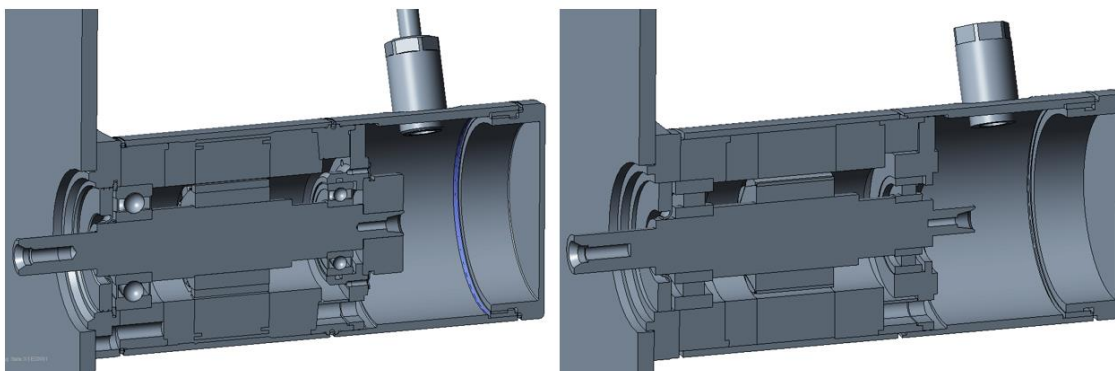
Pomocí softwaru CREO PARAMETRIC 3.0 ve studentské licenci byl vytvořen 3D model geometrie. Model byl zjednodušen o veškeré přechody průměrů do 0,5mm, sražené hrany, zápichy a rádiusy do 1mm. Tyto prvky geometrie neovlivňují výrazným způsobem výsledné teploty a navyšují počet prvků sítě.

Dalším zjednodušením bylo ložisko a vinutí. U ložiska je namísto valivých elementů válec se shodnou plochou průřezu. Kuličkové valivé elementy mohou způsobit numerickou nestabilitu a stejně jako předešlé prvky geometrie kladou vysoké požadavky na počet prvků sítě. U statoru došlo k několika zjednodušením. Prvním je vinutí. Místo navinutého vodiče v drážce byla drážka plně vyplněna objemem. K vinutí jsou na obou čelech připevněna izolační tělesa, tzv. insulátory. Materiál těchto dílů má stejnou tepelnou vodivost jako epoxid, z tohoto důvodu byla zahrnuta do modelu epoxidu.

Při tepelné analýze motoru nebylo uvažováno žádná příslušenství motoru jako např. zpětná vazba a brzda. Tento fakt by neměl tepelnou analýzu příliš ovlivnit vzhledem k tomu, že v těchto součástech nenastanou žádné ztráty výkonu a teplo je vedeno směrem k chladicím plochám, resp. chladicí desce a povrchu motoru.



Obrázek 13 Zjednodušení geometrie – hřídel servomotoru 1



Obrázek 14 Zjednodušení geometrie – řez modelem servomotoru 1

Výpočet byl proveden v softwaru ANSYS 17.2 v prostředí Workbench z důvodu importování geometrie. Nejprve byly nastaveny tepelné vodivosti materiálů v záložce Engineering data. Přehled materiálu je zachycen v následující tabulce 5. Z důvodu částečného utajení nejsou materiály blíže specifikovány a není ukázáno, který díl je vyroben z daného materiálu.

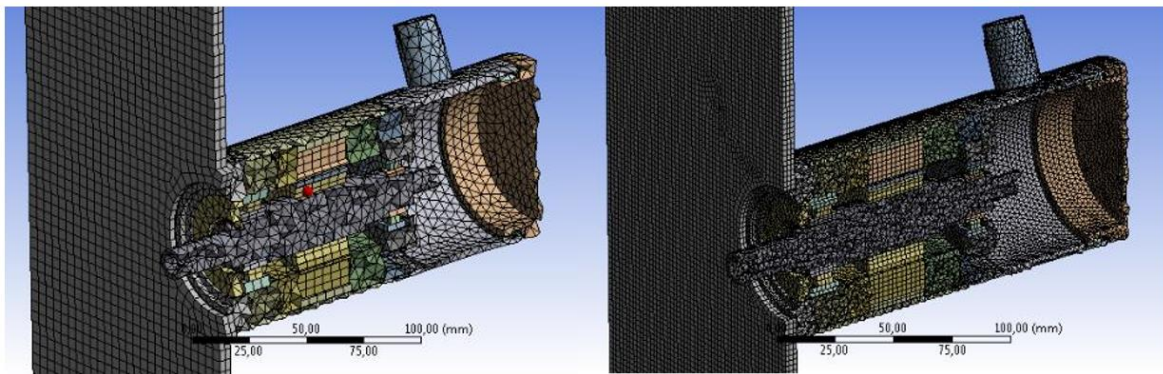
Tabulka 5 Tepelné vodivosti použitých materiálů u servomotoru 1:

Materiál	Tepelná vodivost	Při teplotě
	$\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	$[^{\circ}C]$
<b>Dural</b>	147	Neuvedeno
<b>Epoxid</b>	0,8	Neuvedeno
<b>Ložisková ocel</b>	60	Neuvedeno
<b>Měď s izolací</b>	213	Neuvedeno
<b>Neodym, železo, bor</b>	9	Neuvedeno
<b>Ocel M19-0,5mm</b>	22,5	Neuvedeno
<b>Ocel 11500</b>	25	Neuvedeno
<b>Ocel AISI 303, 304, 321</b>	16,3	100
	21,5	500
<b>Polytetrafluorethylen</b>	0,25	Neuvedeno

Nedílnou součástí úlohy bylo nastavení součinitele přestupu tepla. Úloha obsahovala 182 kontaktních spojů. Každému spoji musely být nastavena kontaktní tepelná vodivost dle tabulky 2 a 3. Bylo potřeba vzít v úvahu výrobní proces jako lisování dílů nebo izolace. Problém nastal u epoxidu a polytetrafluorethylenu, neboť k těmto materiálům nejsou součinitele kontaktních odporů k dispozici. Po konzultaci s vedoucím práce byly hodnoty pro tento materiál nastaveny na  $500 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  pro epoxid, protože pryskyřice se po vytvrzení vždy smrští, což snižuje kontaktní tepelnou vodivost. Pro polytetrafluorethylen byla zvolena hodnota  $4000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ .

### 6.1.2 Síť a okrajové podmínky

Úloha byla spočtena nejprve pro hrubou síť, která obsahovala 130509 uzlů a 51892 prvků, a poté jemnou síť se 667454 uzly a 305493 prvky, čímž byla ověřena konvergence výsledků. Analýza konvergence je zachycena v tabulkách 11, 12 a 13.



Obrázek 15 Hrubá síť (vlevo) a jemná síť (vpravo)

#### 6.1.2.1 Ztráty ve vinutí

Ztráty výkonu byly zadány jako okrajové podmínky. Spojením rovnice (30) a (31) určíme ztráty ve vinutí. Rovnici je nutno rozšířit o člen  $\frac{3}{2}$ , protože udávaný odpor je pro dvě fáze, kdežto motor je třífázový. Pro výpočet ztrát je nutné vycházet z určitých předpokladů pro teploty. Předpokládaná teplota okolí je na  $25^{\circ}\text{C}$  a teplota vinutí  $125^{\circ}\text{C}$ , aby bylo dosaženo oteplení ve vinutí  $100^{\circ}\text{C}$ , což předepisuje standartní zkouška. Katalogová hodnota, která se udává pro teplotu  $25^{\circ}\text{C}$ , odporu vinutí je  $6,1\Omega$ . Jmenovité hodnot proudů byl dodán firmou Kollmorgen.

Ztráty ve vinutí:

$$\begin{aligned}\Delta P_{1Cu} &= \frac{3}{2} \cdot R_0 \cdot [1 + \varepsilon_0 \cdot (T - T_a)] \cdot I_{ef}^2 = \\ &= \frac{3}{2} \cdot 6,1 \cdot [1 + 0,004 \cdot (125 - 25)] \cdot I_{ef}^2\end{aligned}\quad (35)$$

Tabulka 6 Ztráty ve vinutí servomotoru 1:

Otáčky	Jmenovitý proud	Ztráty ve vinutí
	$I_{ef}$	$\Delta P_{1Cu}$
	[A]	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	2,1	56,5
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,9	46,2
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,6	32,8

Ztráty ve vinutí byly zadány do modelu v softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky internal heat generation, která je vhodná pro přeměnu tepla uvnitř objemu, tedy např. přeměnu tepla v důsledku průchodu proudem. Pro zadání internal heat generation je potřeba ztráty výkonu převést na měrné ztráty výkonu na jednotku objemu.

#### 6.1.2.2 Magnetické ztráty

Měrné magnetické ztráty určíme z rovnice (32). Frekvence elektromagnetického pole se určí z jednoduchého vztahu:



$$f = p \cdot \frac{n}{60} \quad (36)$$

kde:  $f$  [Hz] Frekvence elektromagnetického pole  
 $p$  [–] Počet pólových dvojic  
 $n$  [ot · min<sup>-1</sup>] Otáčky elektromagnetického pole

Je potřeba rozlišovat magnetické ztráty v zubech a magnetické ztráty ve jhu z důvodu odlišné magnetické indukce. Magnetická indukce a koeficienty byly dodány firmou Kollmorgen.

Měrné magnetické ztráty ve jhu:

$$\begin{aligned} \Delta p_{1Fej} &= (C_h \cdot f \cdot B^{a+b \cdot B} + C_e \cdot f^2 \cdot B^2) = \\ &= \left( 2,06 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot \frac{n}{60} \cdot B^{1,72+0,21 \cdot B} + 1,028 \cdot 10^{-4} \cdot \left( 5 \cdot \frac{n}{60} \right)^2 \cdot B^2 \right) \end{aligned} \quad (37)$$

Pokud jsou tyto ztráty přenásobeny hmotnostmi, získáme magnetické ztráty. Hmotnost lze jednoduše určit z objemu 3D CAD modelu přenásobením hustotou a laminačním faktorem.

Magnetické ztráty ve jhu:

$$\Delta P_{1Fej} = m_{1j} \cdot \Delta p_{1Fej} = 0,95 \cdot 7850 \cdot 2,25 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_{1Fej} \quad (38)$$

Tabulka 7 Magnetické ztráty ve jhu servomotoru 1:

Otáčky	Magnetická indukce	Měrné magnetické ztráty	Magnetické ztráty
	$B$	$p_{1Fej}$	$\Delta P_{1Fej}$
	[T]	$\left[ \frac{W}{kg} \right]$	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	1,09	0,44	0,10
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,08	7,32	1,23
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,08	21,30	3,57

Měrné magnetické ztráty v zubech:

$$\begin{aligned} \Delta p_{1Fe200z} &= (C_h \cdot f \cdot B^{a+b \cdot B} + C_e \cdot f^2 \cdot B^2) = \\ &= \left( 2,06 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot \frac{n}{60} \cdot B^{1,72+0,21 \cdot B} + 1,028 \cdot 10^{-4} \cdot \left( 5 \cdot \frac{n}{60} \right)^2 \cdot B^2 \right) \end{aligned} \quad (39)$$

Magnetické ztráty v zubech:

$$\Delta P_{1Fe200z} = m_{1z} \cdot \Delta p_{1Fe200z} = 0,95 \cdot 7850 \cdot 2,87 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_{1Fe200z} \quad (40)$$



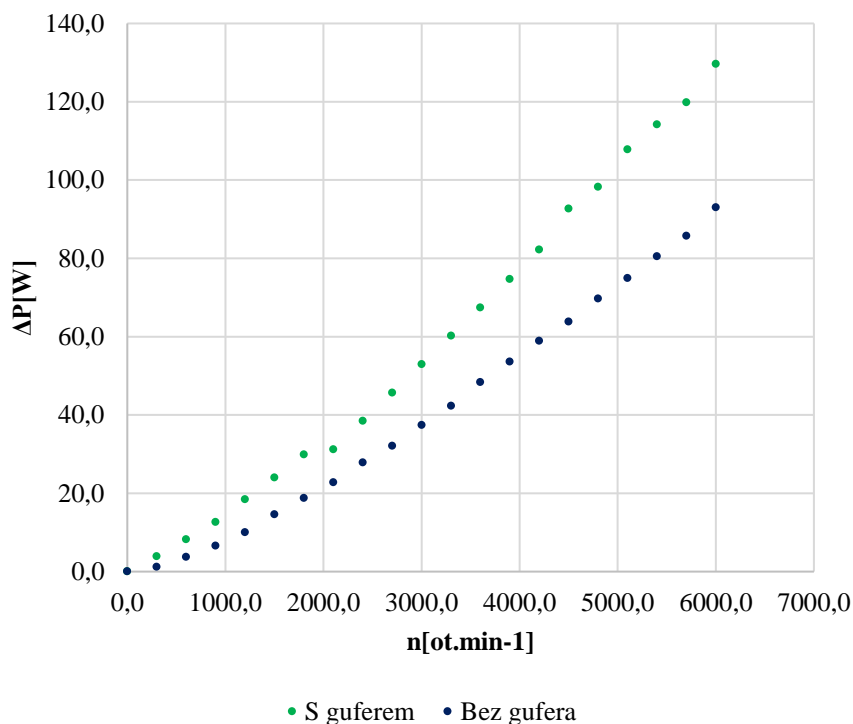
Tabulka 8 Magnetické ztráty v zubech servomotoru 1:

Otáčky	Magnetická indukce	Měrné magnetické ztráty	Magnetické ztráty
	$B$	$p_{1Fej}$	$\Delta P_{1Fej}$
	[T]	$\left[\frac{W}{kg}\right]$	[W]
$200ot \cdot min^{-1}$	1,32	0,65	0,15
$2000ot \cdot min^{-1}$	1,30	10,62	2,27
$4000ot \cdot min^{-1}$	1,28	29,93	6,40

Magnetické ztráty ve vinutí byly zadány do modelu v softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky internal heat generation, která je vhodná pro přeměnu tepla uvnitř objemu, tedy např. přeměnu tepla v důsledku přemagnetování jádra. Pro zadání internal heat generation je potřeba ztráty výkonu převést na měrné ztráty výkonu na jednotku objemu.

#### 6.1.2.3 Ztráty v guferu

Ztráty v guferu byly stanoveny ze zkoušky naprázdno s guferem a bez gufera. Zkouška naprázdno udává magnetické ztráty spolu se ztrátami v ložiscích, třením o vzduch, případně i ztrátami v guferu. Hodnoty z této zkoušky nelze přímo porovnávat se součtem mechanických a magnetických ztrát, protože vypočtené ztráty zohledňují teplotu, kdežto zkouška naprázdno byla provedena za pokojové teploty.



Obrázek 16 Zkouška naprázdno servomotoru 1

Odečtením ztráty získáme ztráty v guferu.

Tabulka 9 Ztráty v guferu servomotoru 1:

Otáčky	Ztráty s guferem	Ztráty bez gufera	Mechanické ztráty v guferu
	$\Delta P_{1SG}$	$\Delta P_{1BG}$	$\Delta P_{1G}$
	[W]	[W]	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	2,7	0,4	2,3
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	30,3	20,1	10,2
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	79,7	57,1	22,6

Pozn.: Ztráty pro 200ot · min<sup>-1</sup> byly zjištěny z proložení přímkou mezi 0ot · min<sup>-1</sup> a 250ot · min<sup>-1</sup>.

Ztráty v guferu je vhodné zadat do softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky heat flux, který udává tepelný tok plochou. Po zadání však teplota v guferu vzrostla na nesmyslně vysokou hodnotu. Což je pravděpodobně způsobeno rozdílem ztrát za studena a za tepla. Z tohoto důvodu byly ztráty zadány podmínkou internal heat generation na objemu gufera a hřídele. Tato okrajová podmínka pravděpodobně způsobí vyšší teplota na celém rotoru a je tomu potřeba přizpůsobit kontaktní tepelnou vodivost.

#### 6.1.2.4 Ztráty v ložiscích

V případě servomotoru jsou součástí mechanických ztrát ztráty v ložiscích, ztráty v guferu a ztráty třením o vzduch. Ztráty třením o vzduch jsou obtížně stanovitelné a tvoří zanedbatelnou složku z hlediska řešení daného problému a nejsou ve výpočtu uvažovány.

Při rešerši nebyl nalezen žádný zdroj pro ztráty v ložiscích. Nejjednodušším způsobem, jak zjistit ztráty v ložiscích při dané teplotě je z katalogu výrobce ložisek SKF. Do konfiguratoru bylo zadáno ekvivalentní ložisko od SKF se stejnými průměry, hloubkou a tukem. Ztráty jsou vždy nakonfigurovány pro předpokládanou teplotu 100°C. Nevýhodou tohoto postupu pro zjištění ztrát v ložiscích je zaokrouhlení na jednotky.

Tabulka 10 Ztráty v ložiscích servomotoru 1 [15]:

Otáčky	Ztráty předního ložiska	Ztráty zadního ložiska
	$\Delta P_{1ZL}$	$\Delta P_{1ZL}$
	[W]	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	0	0
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	2	1
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	5	3

Ztráty v ložiscích je byly zadány do softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky heat flux.

### 6.1.2.5 Chlazení motoru

Protože byl motor chlazen samovolně, bylo chlazení zadáno pomocí okrajové podmínky convection a radiation. Pro zadání konvekce je potřebné znát součinitel přestupu tepla a teplotu povrchu a teplotu okolí viz rovnice (14). Předpokládaná teplota povrchu byla 100°C a teplota okolí na již zmíněných 25°C. Pro zadání radiace stačí emisivita a teplota okolí. Emisivita nerezové oceli je 0,16.

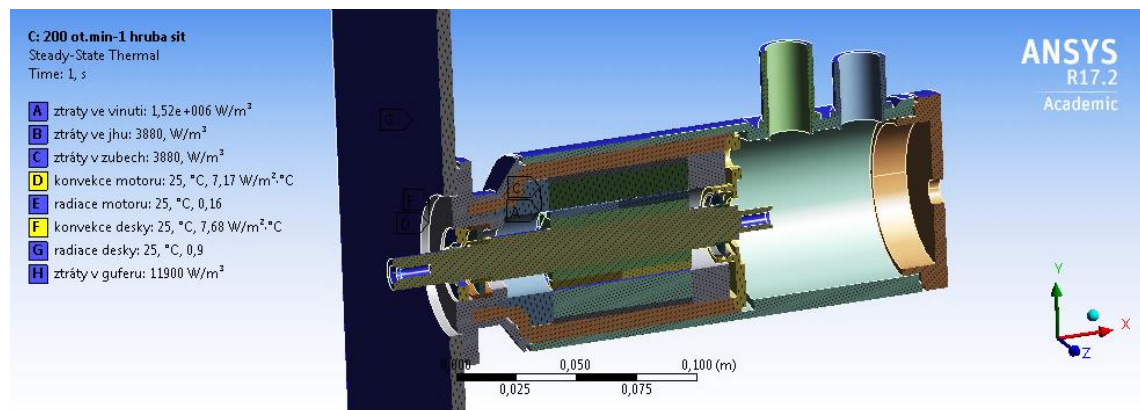
$$\begin{aligned}\alpha_k &= C_k \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \frac{1,315}{\sqrt[4]{D}} \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \\ &= \frac{1,315}{\sqrt[4]{8,17 \cdot 10^{-2}}} \cdot \sqrt[4]{100 - 25} = 7,24 \frac{W}{m^2 \cdot K}\end{aligned}\quad (41)$$

### 6.1.2.6 Chlazení desky

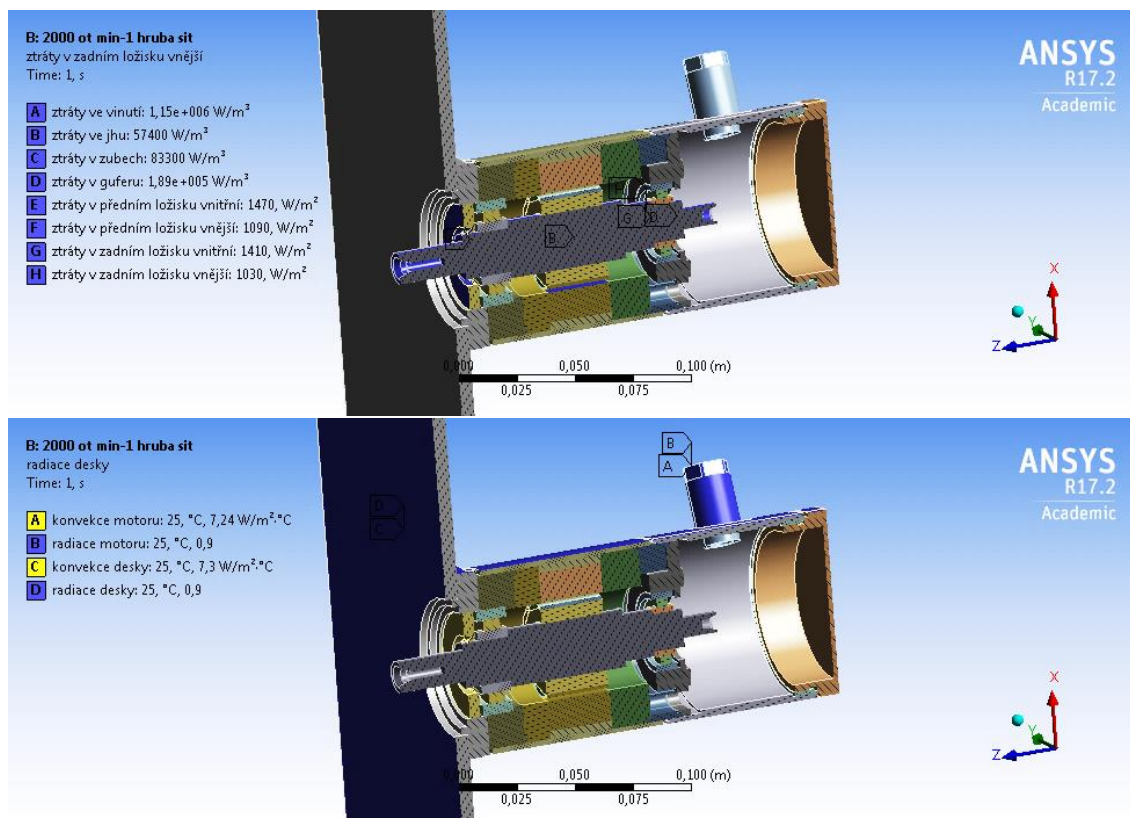
Obdobným způsobem bylo zadáno chlazení desky. Předpokládaná teplota desky byla 50°C. Tato teplota vycházela v numerických simulacích. Emisivita chladicí desky je 0,9.

$$\begin{aligned}\alpha_k &= C_k \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \frac{1,365}{\sqrt[4]{H}} \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \\ &= \frac{1,365}{\sqrt[4]{0,254}} \cdot \sqrt[4]{50 - 25} = 4,30 \frac{W}{m^2 \cdot K}\end{aligned}\quad (42)$$

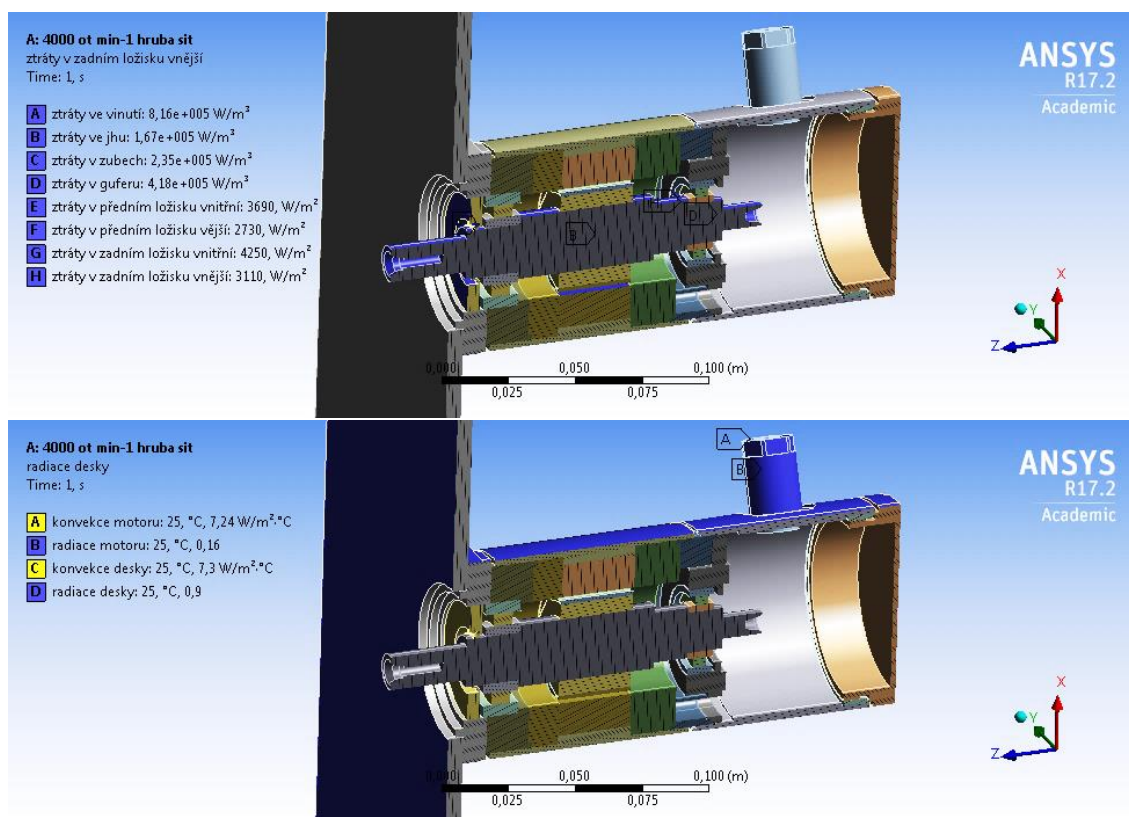
*Pozn.: Hodnotu konvekce na chladicí desce bylo nutné povýšit na  $7,30 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . Deska je dále chlazena směrem k šasi testovacího zařízení.*



Obrázek 17 Okrajové podmínky pro 200 otáček za minutu servomotoru 1



Obrázek 18 Okrajové podmínky pro 2000 otáček za minutu servomotoru 1



Obrázek 19 Okrajové podmínky pro 4000 otáček za minutu servomotoru 1

Pozn.: Na obrázku se nepodařilo zobrazit všechny okrajové podmínky, nicméně zadané jsou všechny a žádná není potlačena.

### 6.1.3 Dosažené výsledky

Jak bylo předesláno v kapitole 6.1.2 úloha byla spočtena pro dvě různé sítě, aby byla ověřena konvergence výsledků. Analýza konvergence je zachycena v tabulce 11, 12 a 13.

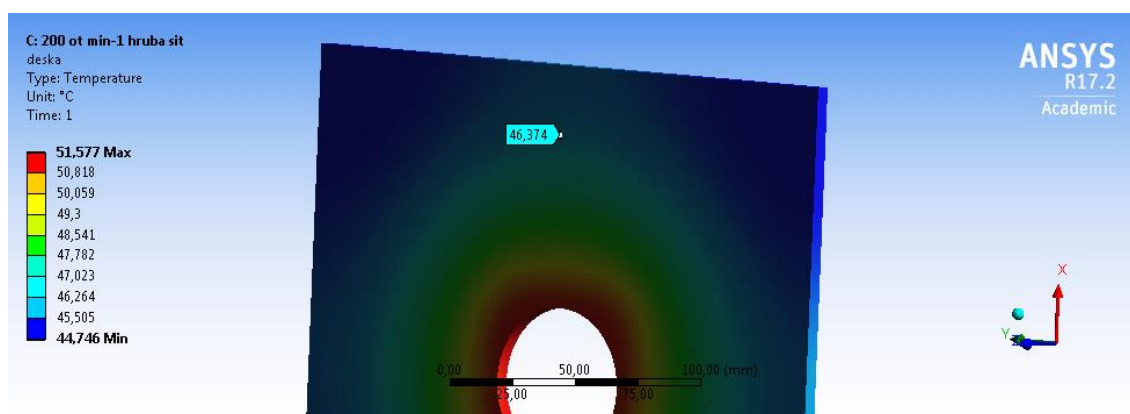
Hrubá síť obsahovala 130509 uzlů a 51892 prvků, a jemná síť 667454 uzlů a 305493 prvků, čímž byla ověřena konvergence výsledků.

Tabulka 11 Analýza konvergence sítě pro 200 otáček za minutu servomotoru 1:

Místo	Hrubá síť	Jemná síť	Rozdíl
	[°C]	[°C]	[%]
Chladicí deska	46,4	46,3	0,2
Stator – přední ložisko	87,4	87,9	0,6
Stator – vinutí	125,9	126,7	0,6
Stator – zadní ložisko	89,8	90,3	0,6
Stator – povrch	104,3	105,0	0,7
Rotor – laminace	89,9	90,6	0,2
Rotor – přední ložisko	86,2	86,0	0,8
Součet ztrát konvekci a radiací	58,7	58,7	0

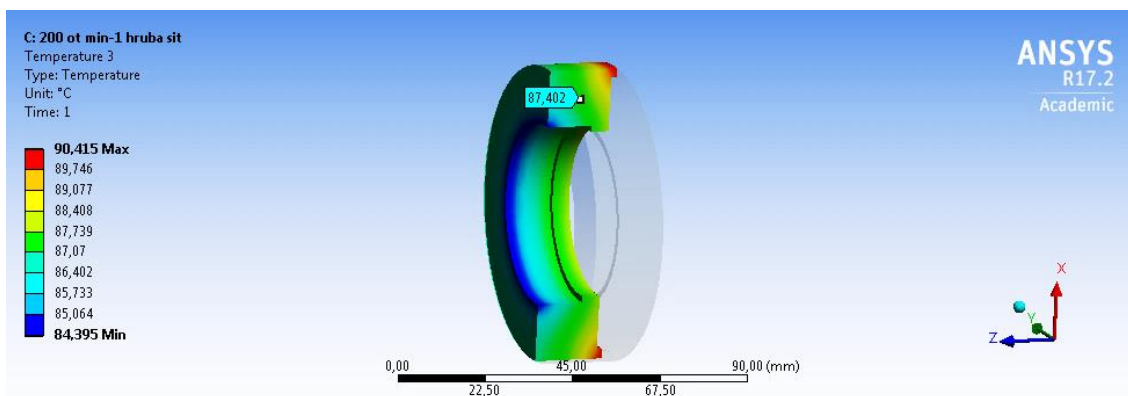
Pozn.: Teplota byly zjištěny přes lokální souřadnicové systémy, takže jsou vždy ve stejném místě pro obě simulace.

Vzhledem k tomu, že nenastal rozdíl výsledků větší, než 5%, lze považovat výsledky za konečné. Z výsledků je zřejmé, že hrubá síť postačuje pro analýzu.

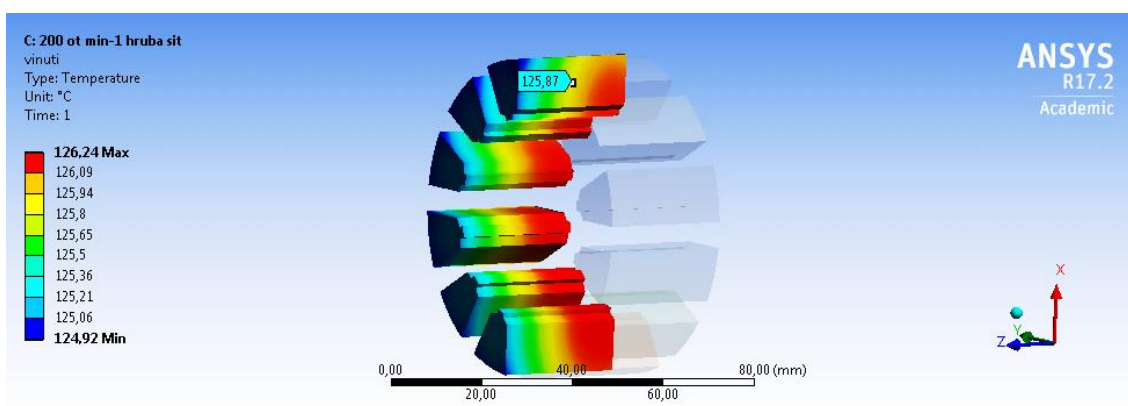


Obrázek 20 Teplota desky při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1

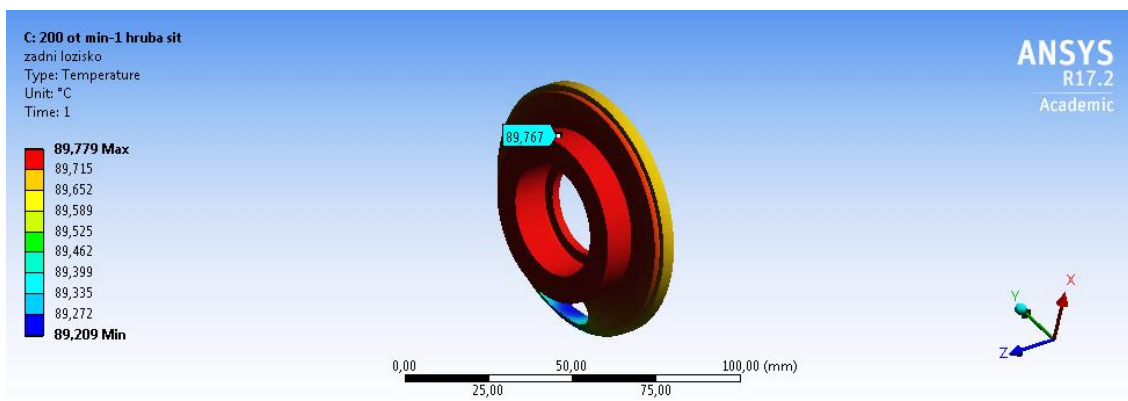




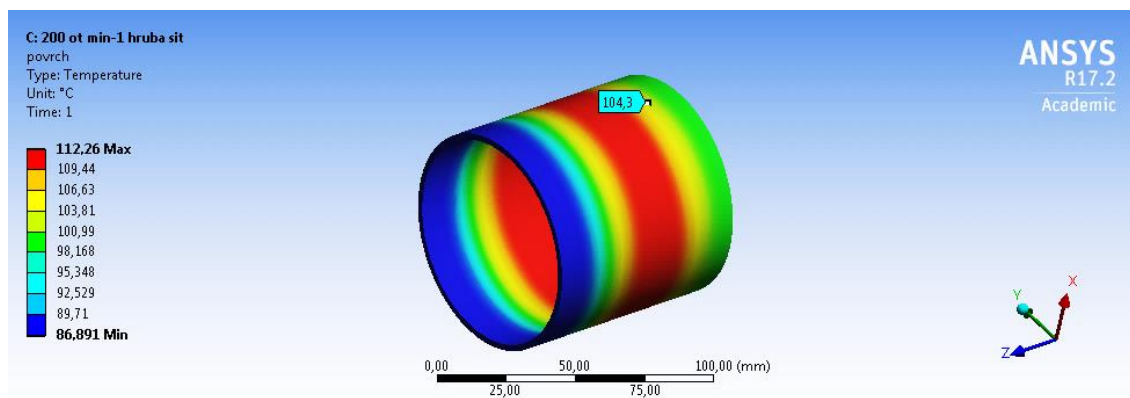
Obrázek 21 Teplota předního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření na statorové části servomotoru 1



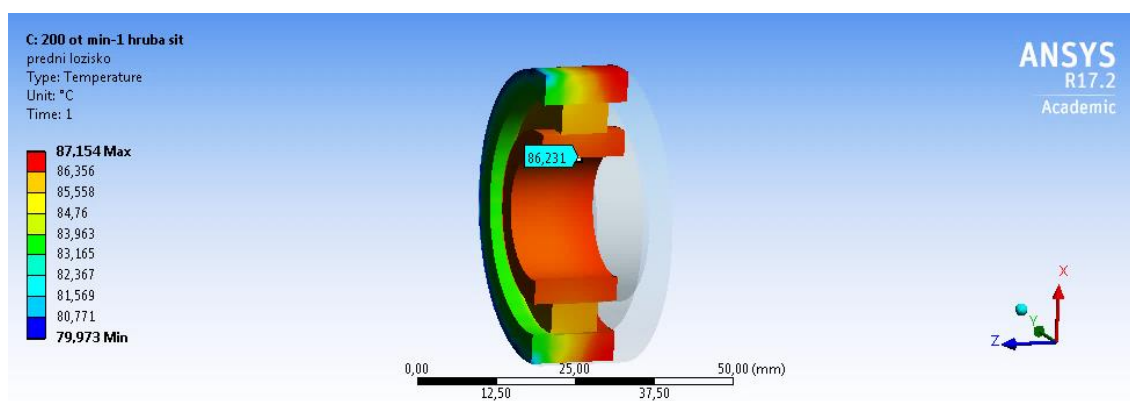
Obrázek 22 Teplota vinutí při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



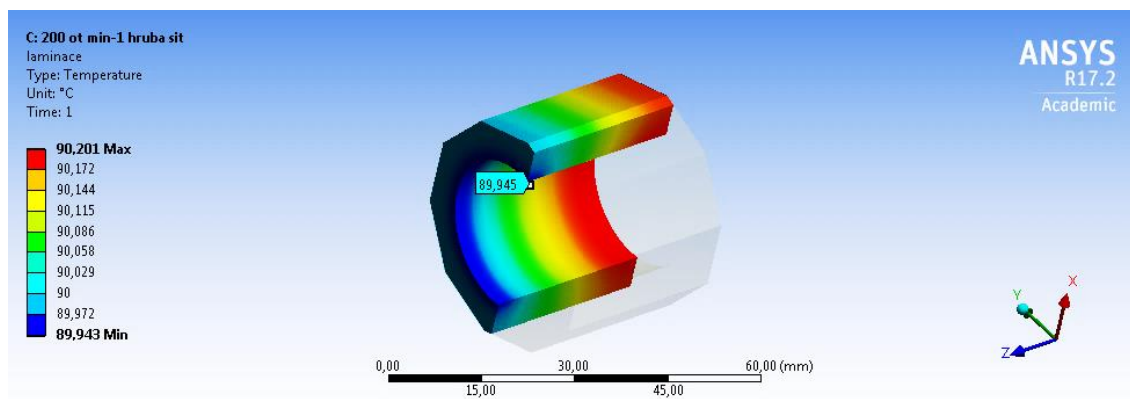
Obrázek 23 Teplota zadního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



Obrázek 24 Teplota povrchu při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



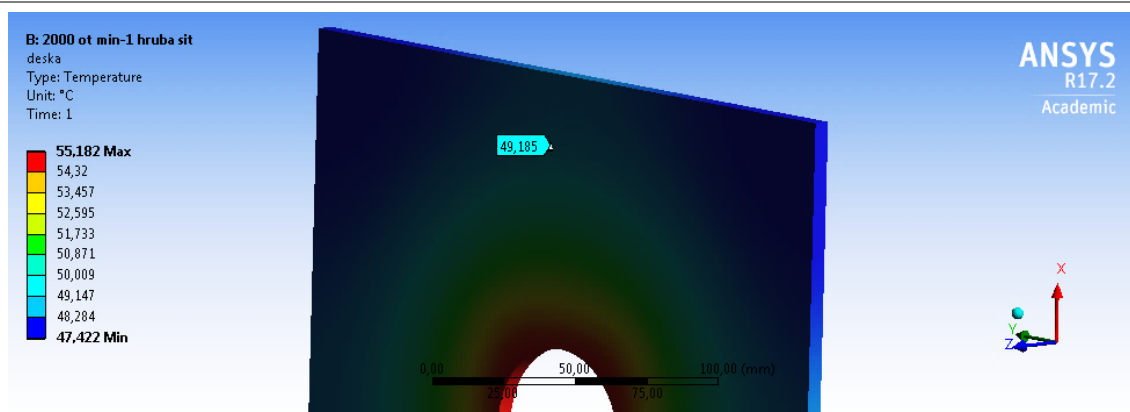
Obrázek 25 Teplota předního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření na rotorové části servomotoru 1



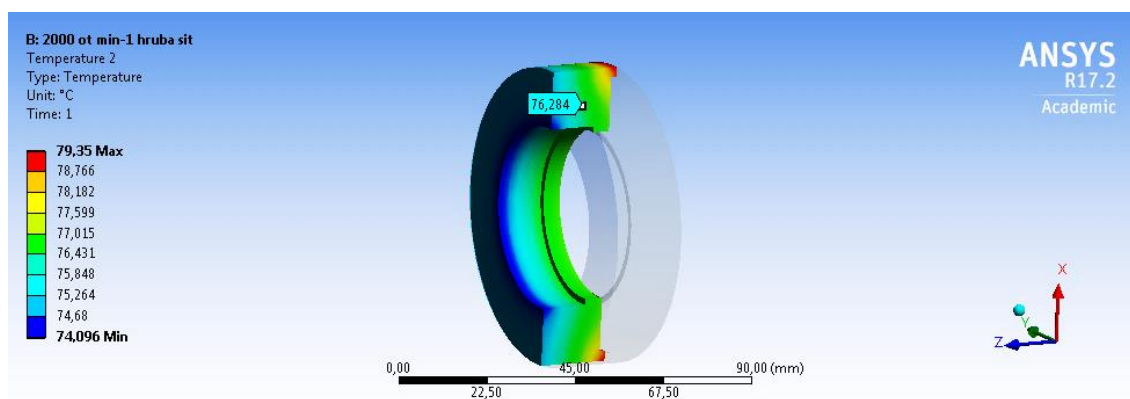
Obrázek 26 Teplota laminace při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1

Tabulka 12 Analýza konvergence sítě pro 2000 otáček za minutu servomotoru 1:

Místo	Hrubá síť	Jemná síť	Rozdíl
	[°C]	[°C]	[%]
Chladicí deska	49,2	49,2	0
Stator – přední ložisko	76,3	76,8	0,7
Stator – vinutí	125,6	126,0	0,3
Stator – zadní ložisko	92,4	92,7	0,3
Stator – povrch	103,6	104	0,4
Rotor – laminace	93,5	93,8	0,3
Rotor – přední ložisko	82,3	82,6	0,4
Součet ztrát konvekcí a radiací	63,0	63,0	0

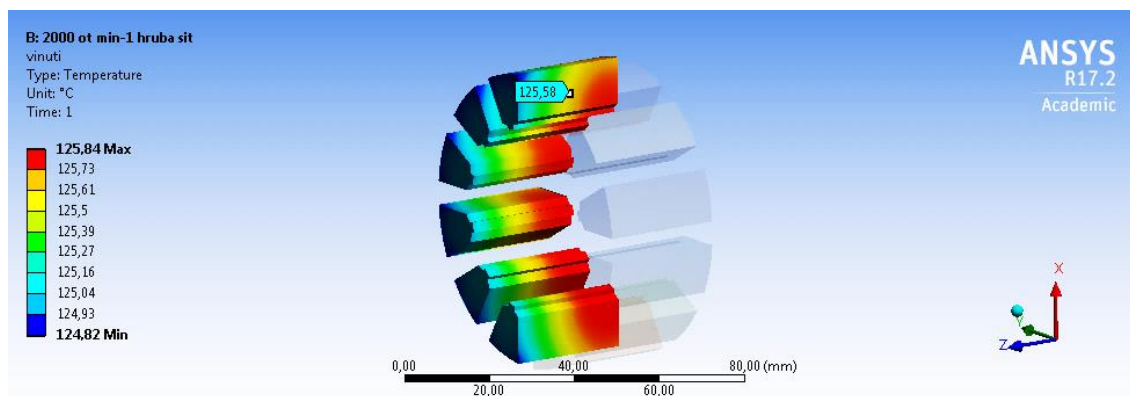


Obrázek 27 Teplota desky při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1

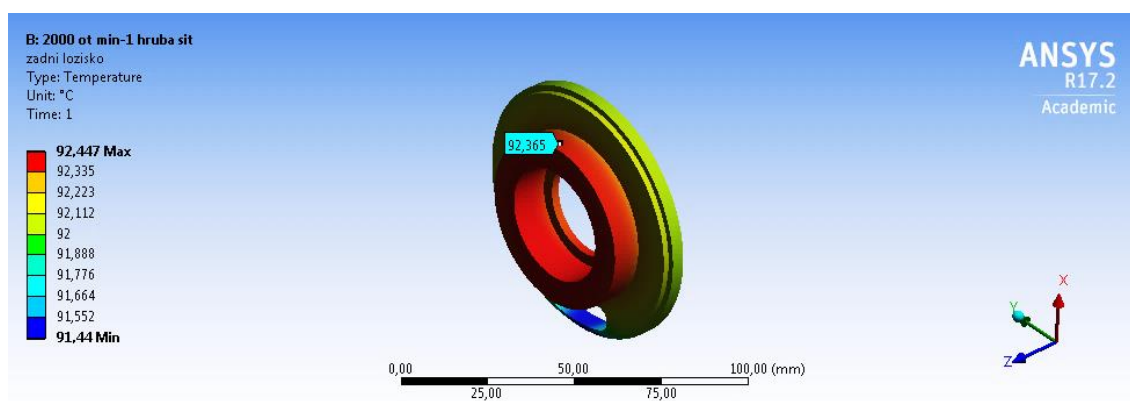


Obrázek 28 Teplota předního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření na statorové části servomotoru 1

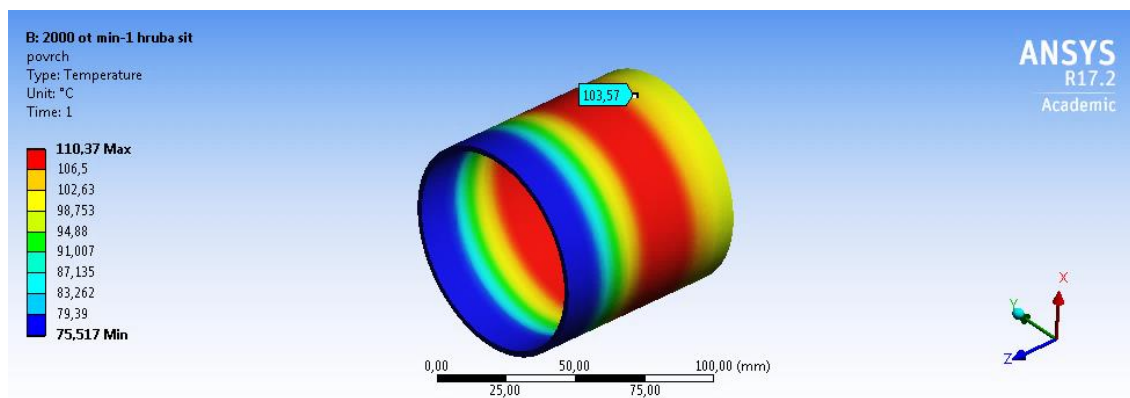




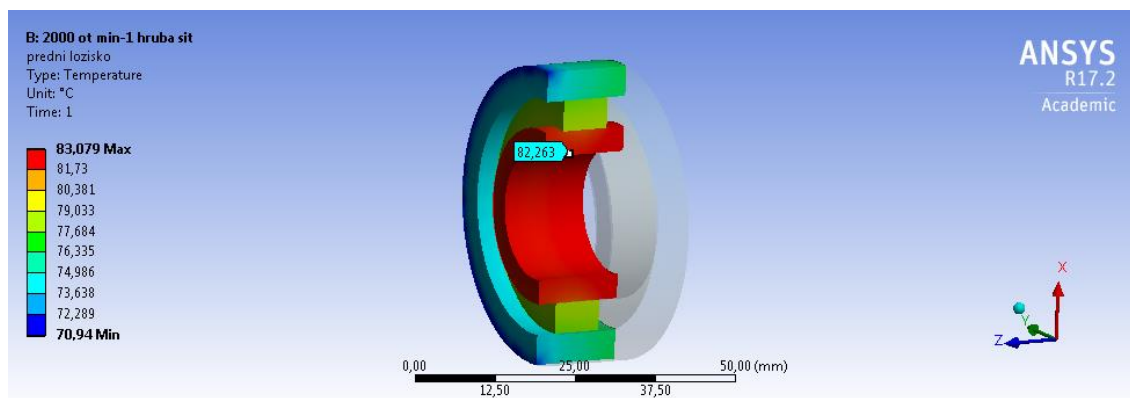
Obrázek 29 Teplota vinutí při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



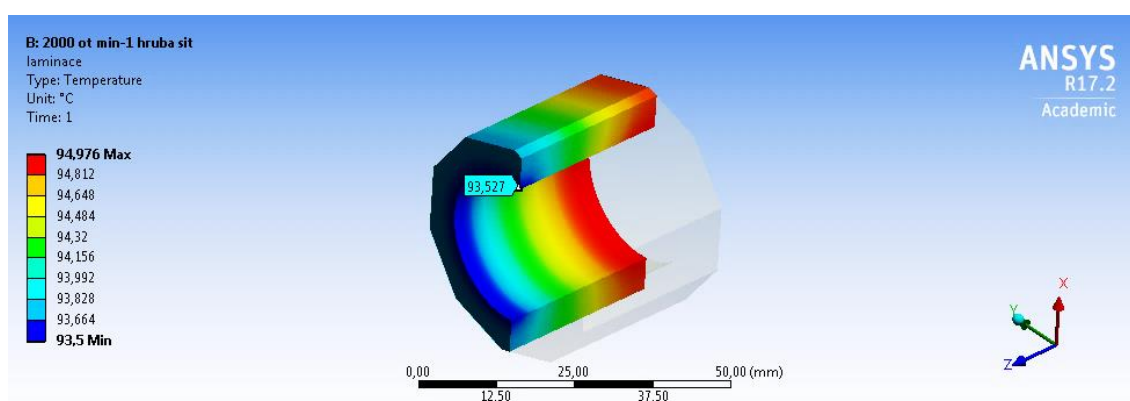
Obrázek 30 Teplota zadního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



Obrázek 31 Teplota povrchu při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



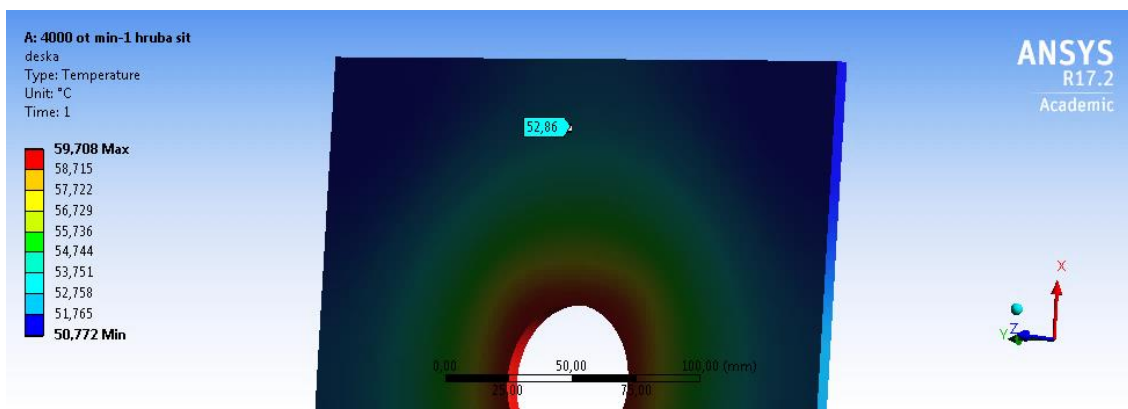
Obrázek 32 Teplota předního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření na rotorové části servomotoru 1



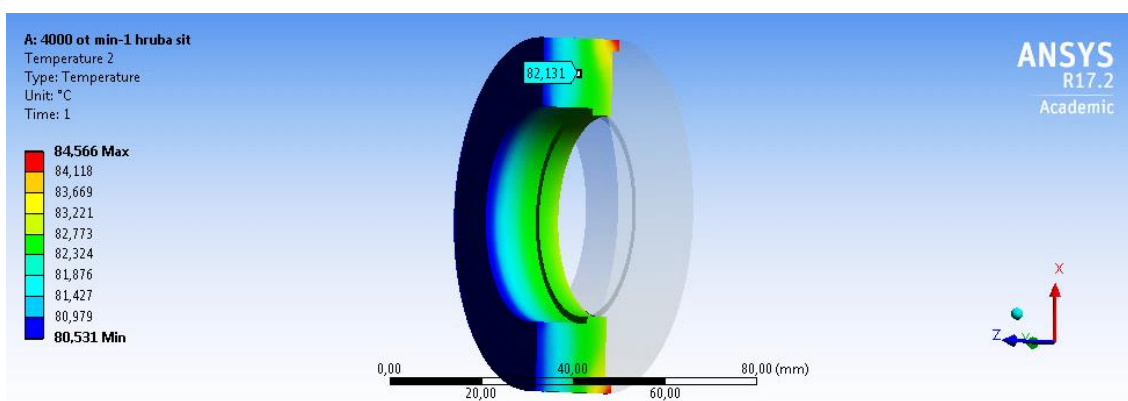
Obrázek 33 Teplota laminace při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1

Tabulka 13 Analýza konvergence sítě pro 4000 otáček za minutu servomotoru 1:

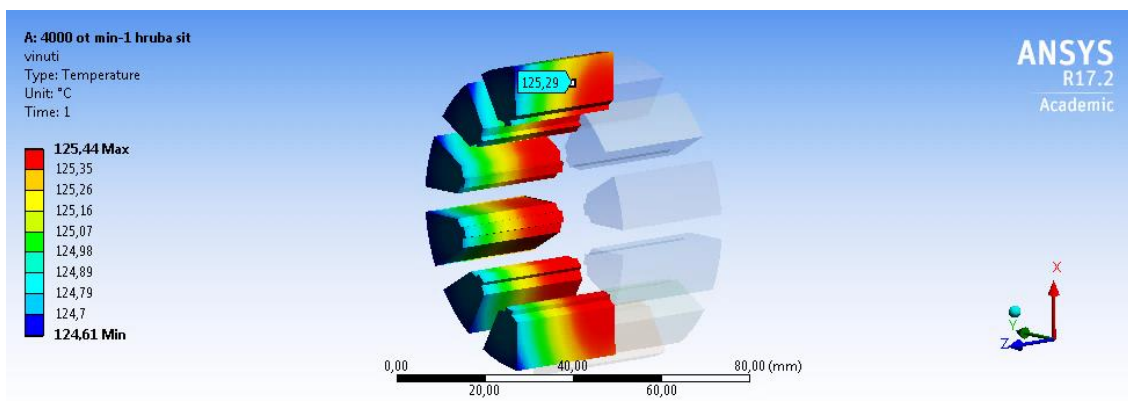
Místo	Hrubá síť	Jemná síť	Rozdíl
	[°C]	[°C]	[%]
Chladicí deska	52,9	52,7	0,4
Stator – přední ložisko	82,1	82,4	0,4
Stator – vinutí	125,3	125,7	0,3
Stator – zadní ložisko	99,6	100,0	0,4
Stator – povrch	103,2	103,6	0,4
Rotor – laminace	105,8	106,4	0,6
Rotor – přední ložisko	97,1	97,5	0,9
Součet ztrát konvekcí a radiací	73,8	73,2	0



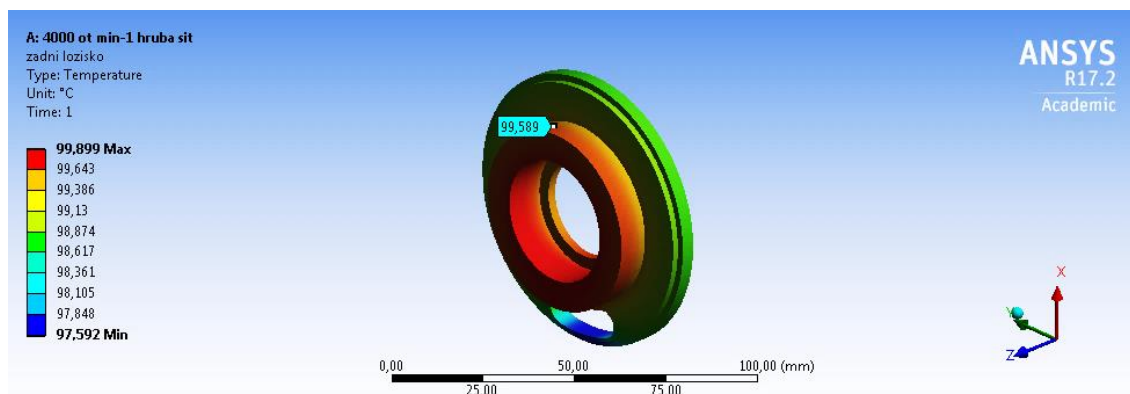
Obrázek 34 Teplota desky při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



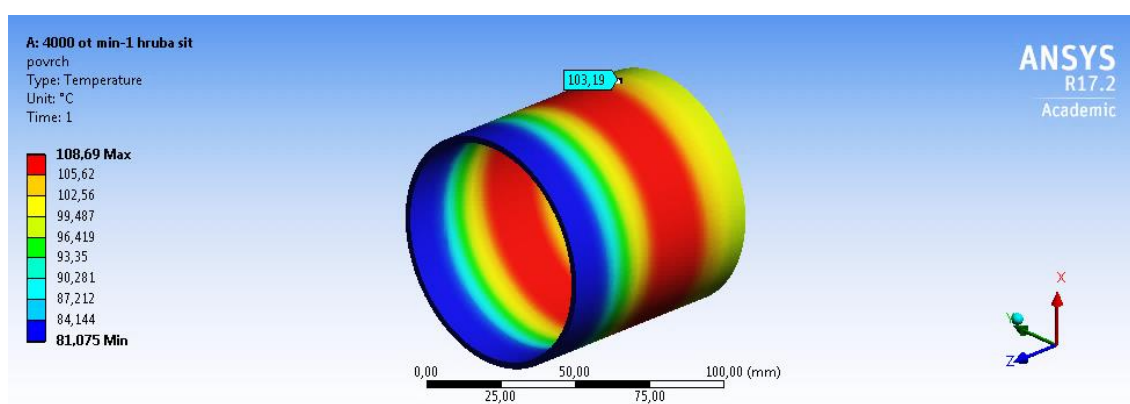
Obrázek 35 Teplota předního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření na statorové části servomotoru 1



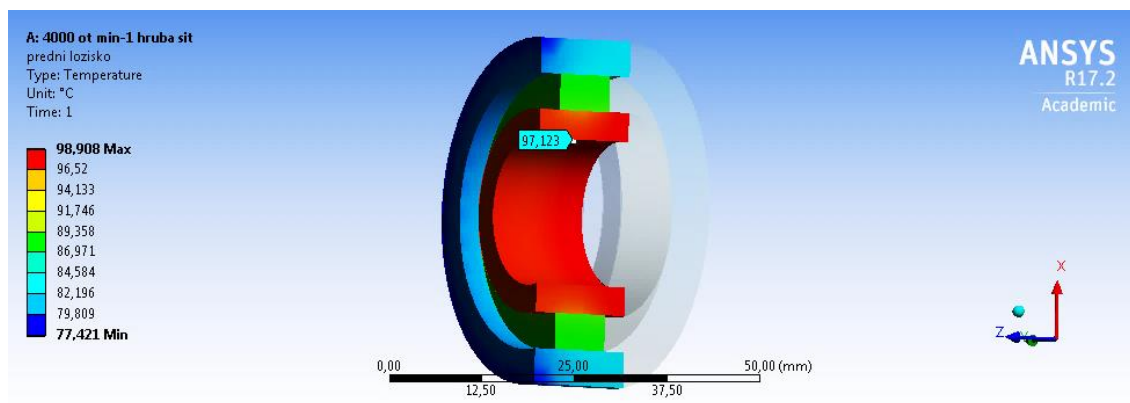
Obrázek 36 Teplota vinutí při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



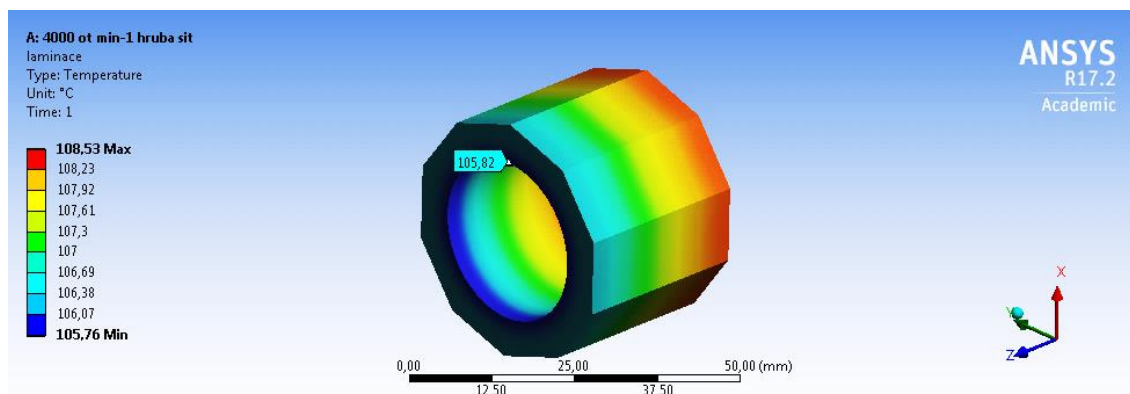
Obrázek 37 Teplota zadního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



Obrázek 38 Teplota povrchu při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1



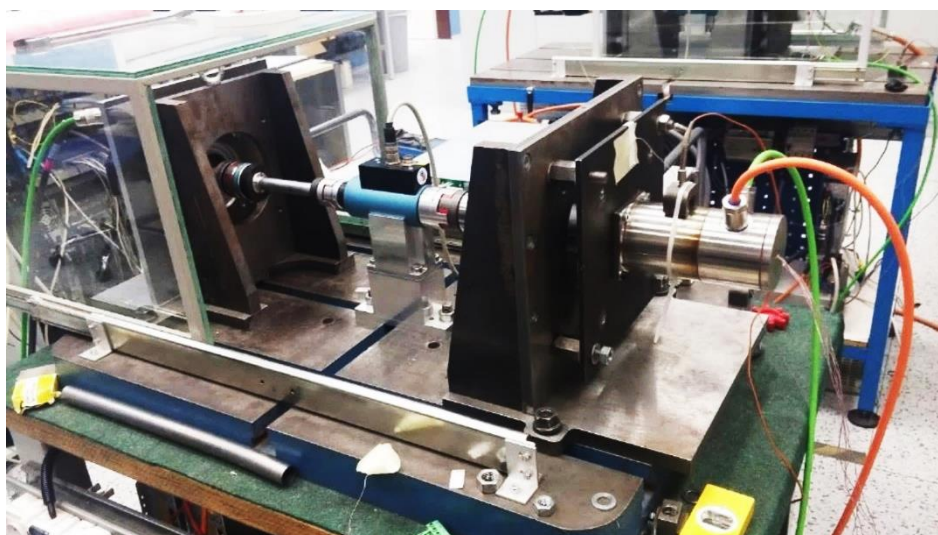
Obrázek 39 Teplota předního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření na rotorové části servomotoru 1



Obrázek 40 Teplota laminace při 4000 otáček za minutu v místě měření servomotoru 1

#### 6.1.4 Verifikace výpočtu

Verifikace probíhala zkouškou oteplení motoru při zadaných otáčkách  $200 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $4000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , tak aby bylo dosaženo oteplení ve vinutí minimálně  $100^\circ\text{C}$ . Tomuto účelu byl přizpůsoben zátěžný moment motoru. Na motor bylo umístěno celkem 6 termočlánků. Měřila se také teplota okolí a chladicí desky.

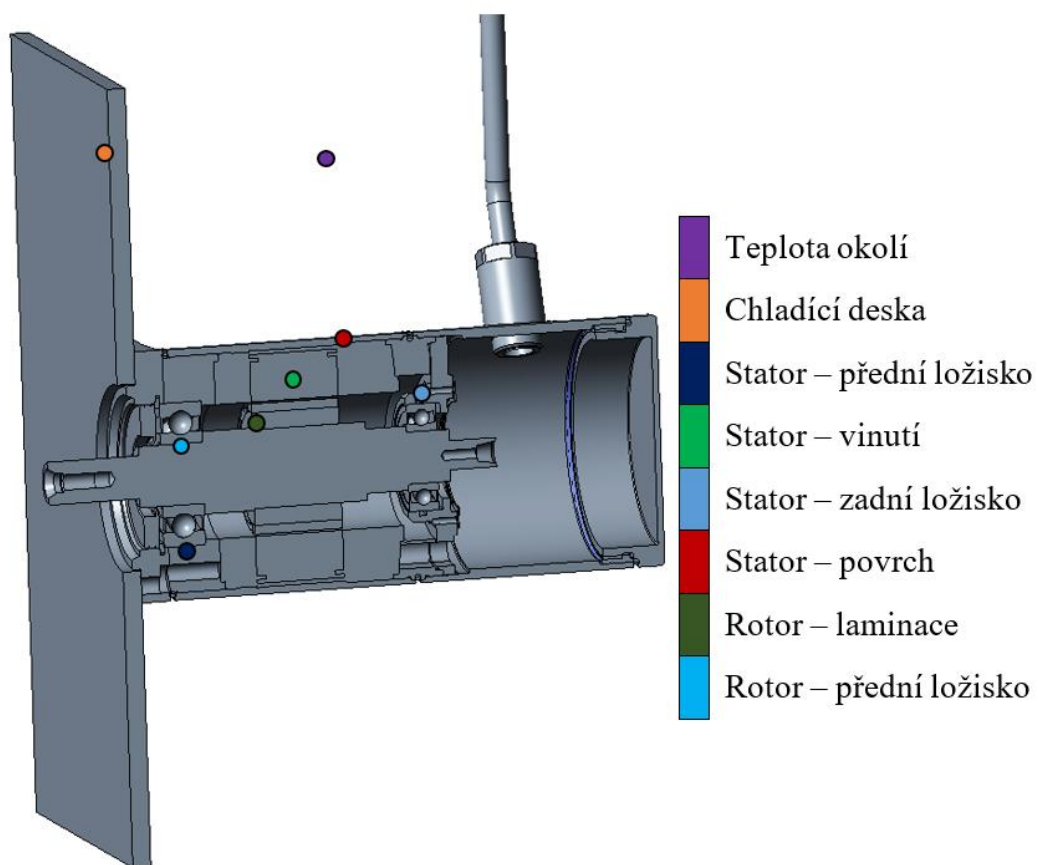


Obrázek 41 Dynamometr pro zkoušku oteplení servomotoru 1

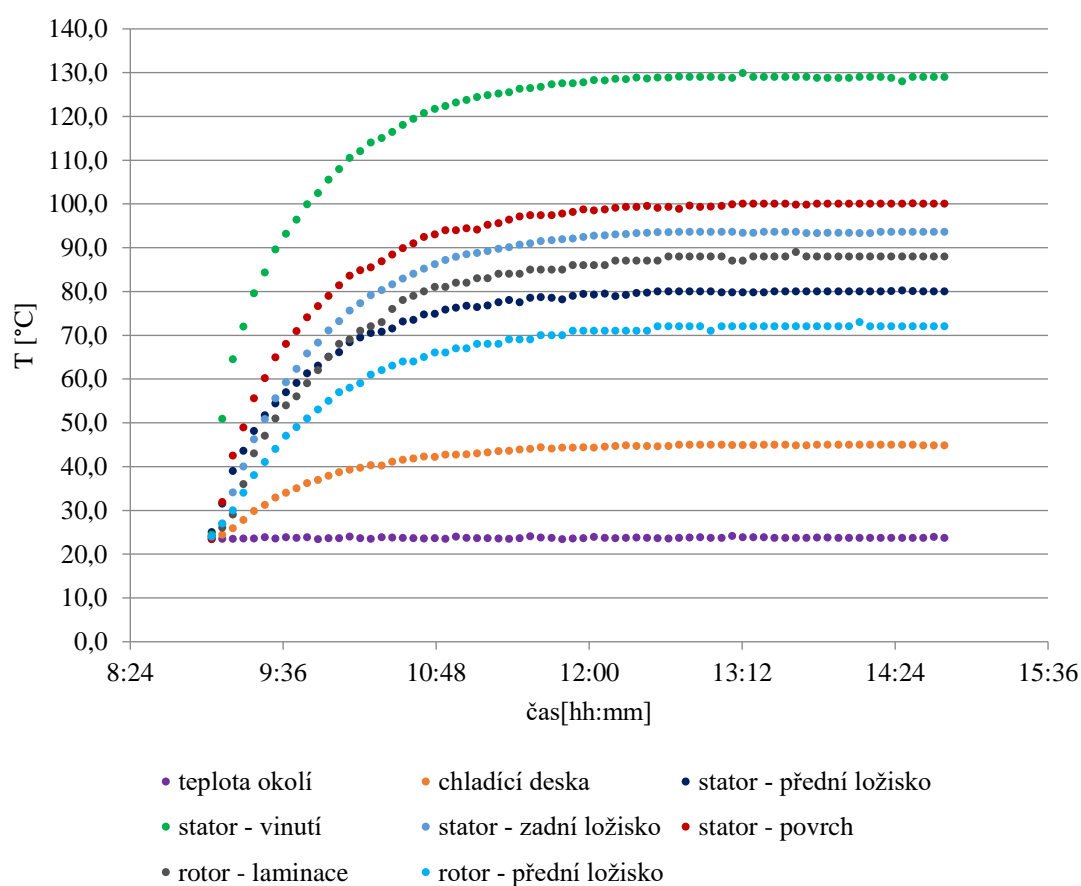




Obrázek 42 Montáž termočlánků pro snímání teploty vinutí a předního ložiska před zalitím epoxidem (vlevo) a zadního ložiska (vpravo) (umístění termočlánků je vyznačeno modrou barvou)



Obrázek 43 Řez servomotorem 1 - body měření teploty

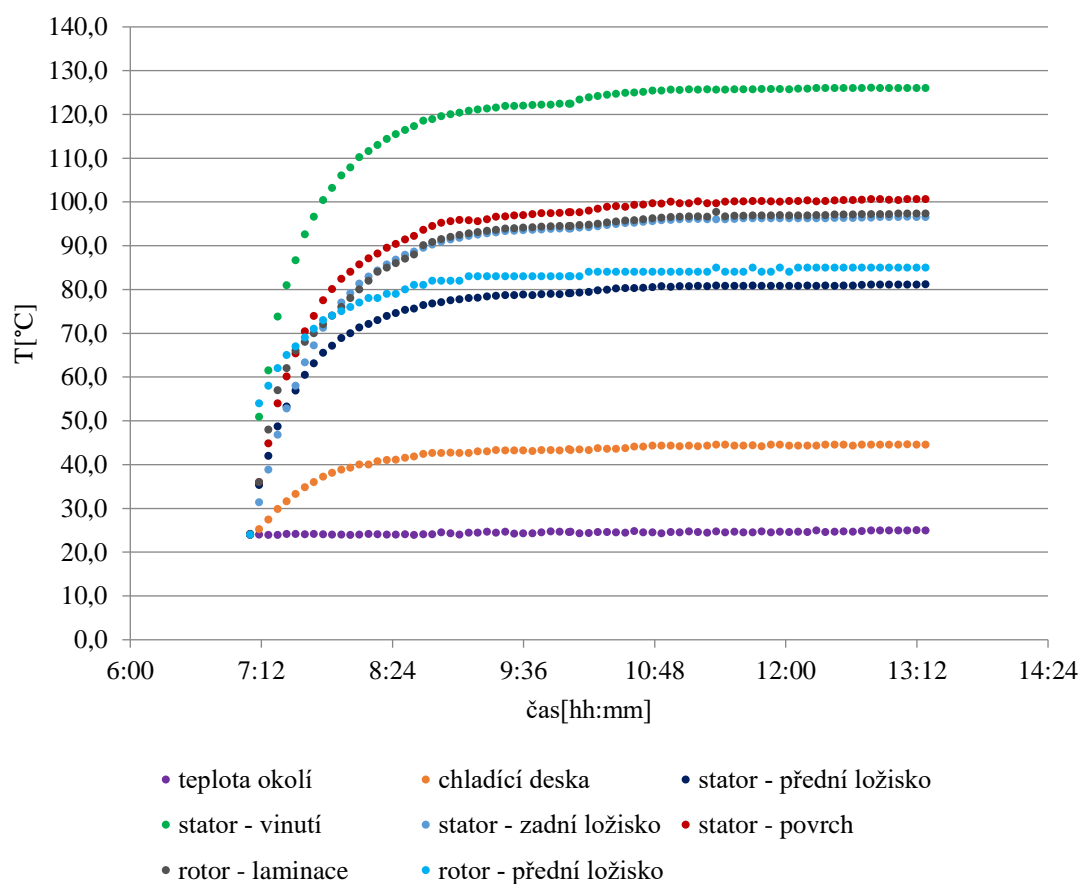


Obrázek 44 Zkouška oteplení servomotoru 1 pro zátěžný moment 1,40Nm při 200 otáčkách za minutu

Pozn.: Teploty měřené na rotoru jsou měřeny dálkovým vysílačem a ten umožňuje rozlišení pouze na celé stupně.

Tabulka 14 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1 při 200 otáčkách za minutu:

Místo	Experiment [°C]	MKP [°C]	Rozdíl [%]
	[°C]	[°C]	[%]
<b>Teplota okolí</b>	23,7	-	-
<b>Chladicí deska</b>	44,9	46,35	3,1
<b>Stator – přední ložisko</b>	80,1	87,4	8,4
<b>Stator – vinutí</b>	128,8	125,9	2,3
<b>Stator – zadní ložisko</b>	93,6	89,8	4,2
<b>Stator – povrch</b>	100,0	104,3	4,1
<b>Rotor – laminace</b>	88,0	89,9	2,1
<b>Rotor – přední ložisko</b>	72	86,2	16,5
<b>Celkové ztráty</b>	58,2	58,7	0,9

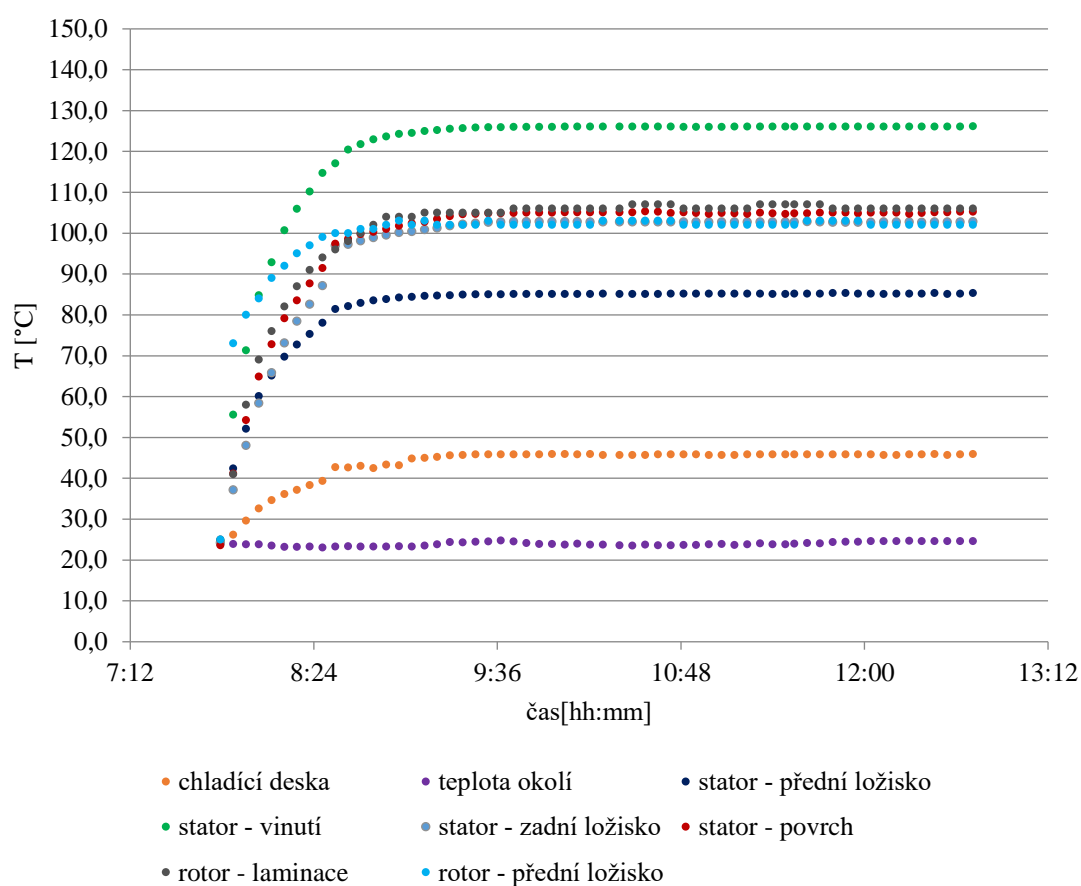


Obrázek 45 Zkouška oteplení servomotoru 1 pro zátěžný moment 1,22Nm při 2000 otáčkách za minutu

Tabulka 15 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1 při 2000 otáčkách za minutu:

Místo	Experiment [°C]	MKP [°C]	Rozdíl [%]
	[°C]	[°C]	[%]
Teplota okolí	24,9	-	-
Chladicí deska	44,5	49,2	9,6
Stator – přední ložisko	81,1	76,3	6,3
Stator – vinutí	126,0	125,6	0,3
Stator – zadní ložisko	96,5	92,4	4,4
Stator – povrch	100,5	103,6	3,0
Rotor – laminace	97,0	93,5	3,7
Rotor – přední ložisko	85,0	82,3	3,3
Celkové ztráty	62,7	63,0	0,5

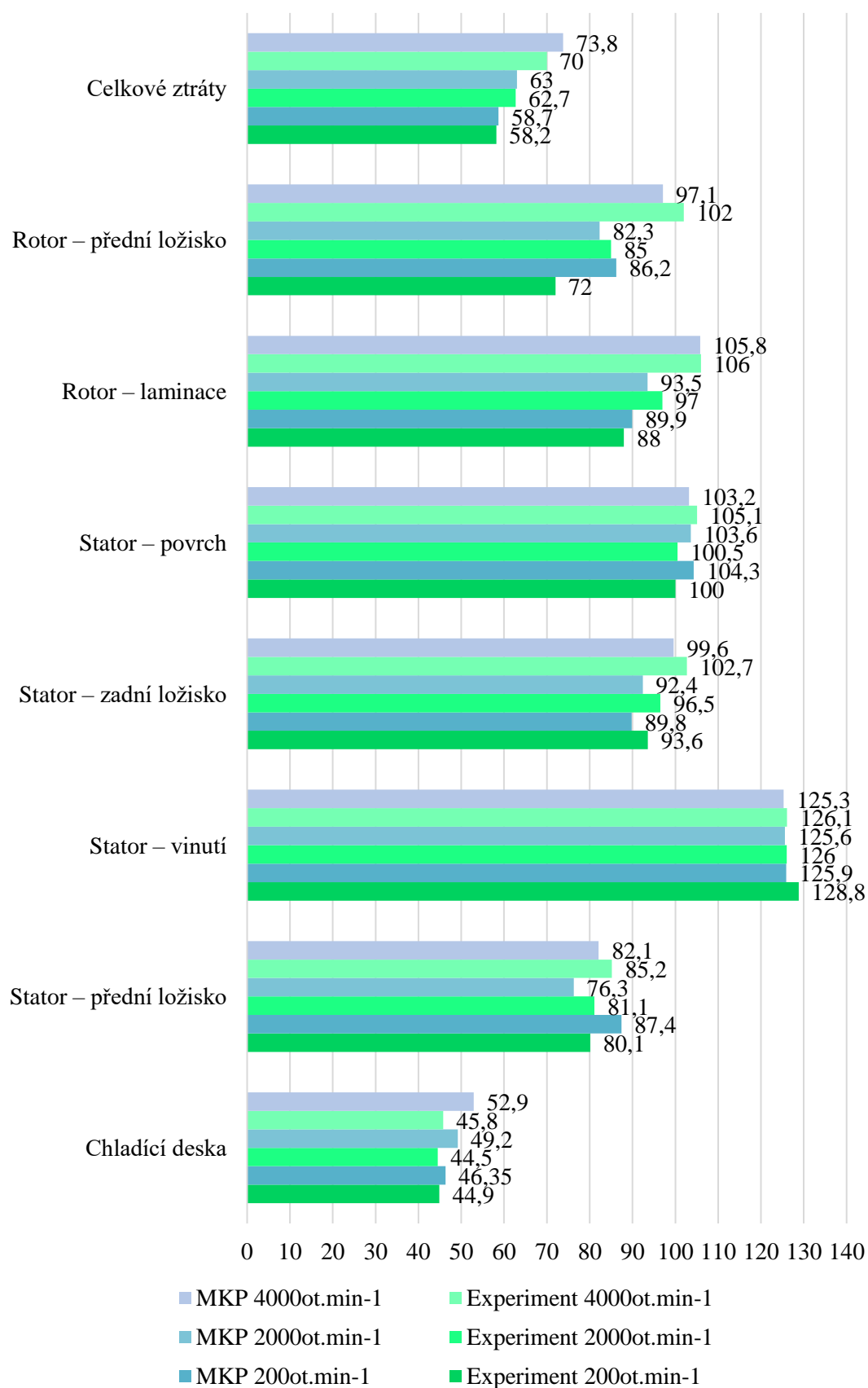




Obrázek 46 Zkouška oteplení servomotoru 1 pro zátěžný moment 1,00Nm při 4000 otáčkách za minutu

Tabulka 16 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1 při 4000 otáčkách za minutu:

Místo	Experiment [°C]	MKP [°C]	Rozdíl [%]
	[°C]	[°C]	[%]
Teplota okolí	24,6	-	-
Chladicí deska	45,8	52,9	13,4
Stator – přední ložisko	85,2	82,1	3,8
Stator – vinutí	126,1	125,3	0,6
Stator – zadní ložisko	102,7	99,6	3,1
Stator – povrch	105,1	103,2	1,8
Rotor – laminace	106,0	105,8	0,2
Rotor – přední ložisko	102,0	97,1	5,0
Celkové ztráty	70,0	73,8	5,2

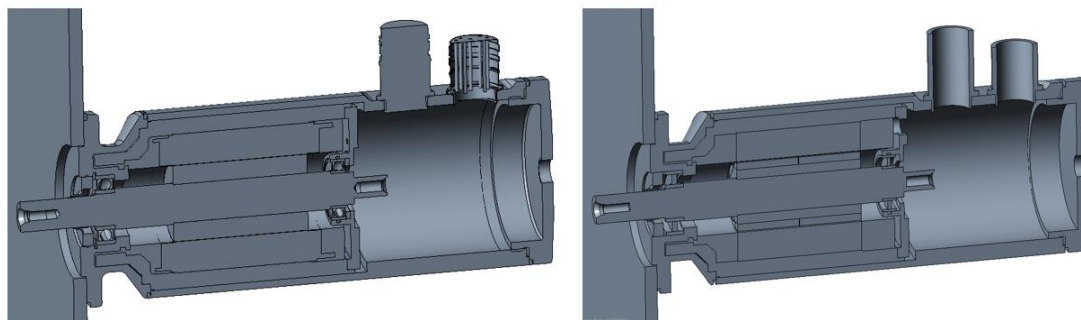


Obrázek 47 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1

## 6.2 Servomotor 2

### 6.2.1 Model geometrie

Obdobně, jako u Servomotoru 1 byl vytvořeno nový model geometrie, který byl zjednodušen o veškeré přechody průměrů do 0,5mm, sražené hrany, zápichy a rádiusy do 1mm. Tyto prvky geometrie neovlivňují výrazným způsobem výsledné teploty a navyšují počet prvků sítě. Rovněž ložiska a stator byl zjednodušen stejným způsobem, viz kapitola 6.1.1.



Obrázek 48 Zjednodušení geometrie – řez modelem servomotoru 2

### 6.2.2 Materiály

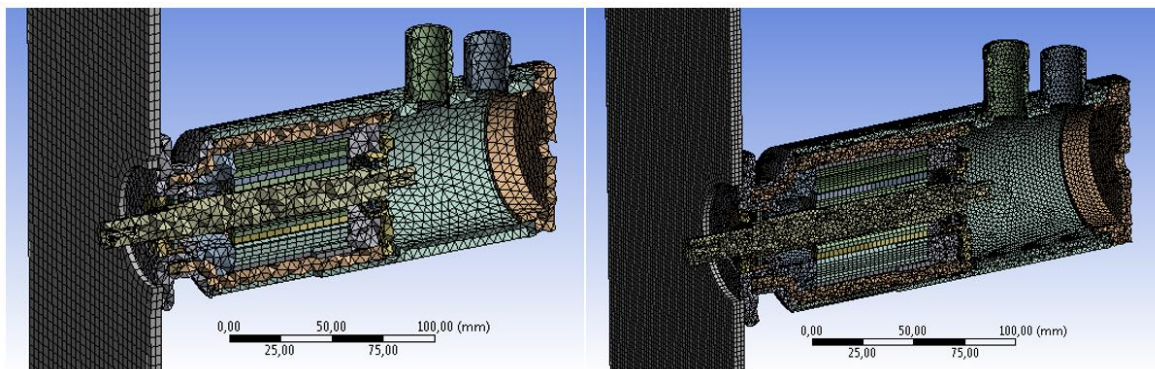
Tabulka 17 Tepelné vodivosti použitých materiálů servomotoru 2:

Materiál	Tepelná vodivost	Při teplotě
	$\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$	$[^{\circ}C]$
Dural	147	Neuvedeno
Epoxid	0,8	Neuvedeno
Ložisková ocel	60	Neuvedeno
Měď s izolací	213	Neuvedeno
Neodym, železo, bor	9	Neuvedeno
Ocel M19-0,5mm	22,5	Neuvedeno
Ocel 11500	25	Neuvedeno
Ocel AISI 316	16,3	100
	21,5	500
Ocel AISI 404C	24,2	Neuvedeno
Polytetrafluorethylen	0,25	Neuvedeno

Tato úloha obsahovala 197 kontaktů, které musely být individuálně nastaveny, viz tabulka 2 a 3.

### 6.2.3 Síť a okrajové podmínky

Úloha byla spočtena pro hrubou síť, která obsahovala 172128 uzlů a 69203 prvků, a jemnou síť se 907705 uzly a 440366 prvky, čímž byla ověřena konvergence výsledků. Analýza konvergence je zachycena v tabulkách 23, 24 a 25.



Obrázek 49 Hrubá síť (vlevo) a jemná síť (vpravo)

#### 6.2.3.1 Ztráty ve vinutí

Pro výpočet ztrát je nutné vycházet z určitých předpokladů pro teploty. Předpokládaná teplota okolí je na  $25^{\circ}\text{C}$  a teplota vinutí  $125^{\circ}\text{C}$ , aby bylo dosaženo ohřátí vinutí na  $100^{\circ}\text{C}$ , což předepisuje standardní zkouška. Katalogová hodnota odporu vinutí, která je udávána při teplotě  $25^{\circ}\text{C}$ , je  $6,6\Omega$ . Jmenovité hodnoty proudů byl dodán firmou Kollmorgen.

Ztráty ve vinutí:

$$\begin{aligned}\Delta P_{1Cu} &= \frac{3}{2} \cdot R_0 \cdot [1 + \varepsilon_0 \cdot (T - T_a)] \cdot I_{ef}^2 = \\ &= \frac{3}{2} \cdot 6,6 \cdot [1 + 0,004 \cdot (125 - 25)] \cdot I_{ef}^2\end{aligned}\quad (43)$$

Tabulka 18 Ztráty ve vinutí servomotoru 2:

Otáčky	Jmenovitý proud	Ztráty ve vinutí
	$I_{ef}$	$\Delta P_{1Cu}$
	[A]	[W]
<b><math>200\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}</math></b>	2,6	93,7
<b><math>2000\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}</math></b>	2,5	83,2
<b><math>4000\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}</math></b>	2,3	73,3

Ztráty ve vinutí byly zadány do modelu v softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky internal heat generation.

#### 6.2.3.2 Magnetické ztráty

Magnetická indukce a koeficienty byly dodány firmou Kollmorgen.

Měrné magnetické ztráty ve jhu:

$$\begin{aligned}\Delta p_{1Fej} &= (C_h \cdot f \cdot B^{a+b \cdot B} + C_e \cdot f^2 \cdot B^2) = \\ &= \left( 2,06 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot \frac{n}{60} \cdot B^{1,72+0,21 \cdot B} + 1,028 \cdot 10^{-4} \cdot \left( 4 \cdot \frac{n}{60} \right)^2 \cdot B^2 \right)\end{aligned}\quad (44)$$

Magnetické ztráty ve jhu:

$$\Delta P_{1Fej} = m_{1j} \cdot \Delta p_{1Fej} = 0,97 \cdot 7850 \cdot 2,96 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_{1Fej} \quad (45)$$

Tabulka 19 Magnetické ztráty ve jhu servomotoru 2:

Otáčky	Magnetická indukce	Měrné magnetické ztráty	Magnetické ztráty
	$B$	$p_{1Fej}$	$\Delta P_{1Fej}$
	[T]	$\left[ \frac{W}{kg} \right]$	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	1,30	0,49	0,1
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,29	7,6	1,8
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,29	21,3	4,9

Měrné magnetické ztráty v zubech:

$$\begin{aligned}\Delta p_{1Fe200z} &= (C_h \cdot f \cdot B^{a+b \cdot B} + C_e \cdot f^2 \cdot B^2) = \\ &= \left( 2,06 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot \frac{n}{60} \cdot B^{1,72+0,21 \cdot B} + 1,028 \cdot 10^{-4} \cdot \left( 4 \cdot \frac{n}{60} \right)^2 \cdot B^2 \right)\end{aligned}\quad (46)$$

Magnetické ztráty v zubech:

$$\Delta P_{1Fe200z} = m_{1z} \cdot \Delta p_{1Fe200z} = 0,97 \cdot 7850 \cdot 4,56 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta p_{1Fe200z} \quad (47)$$

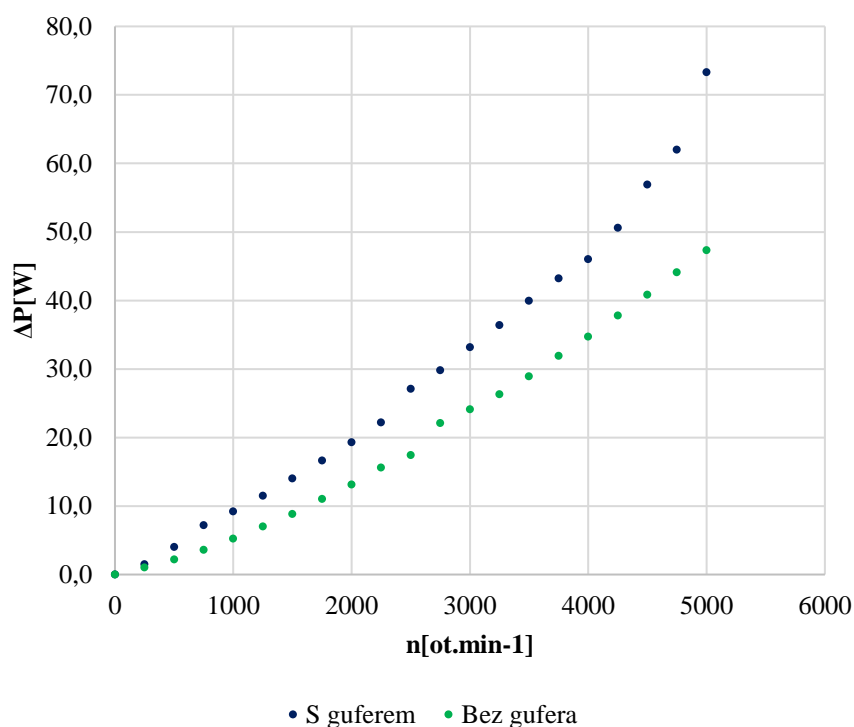
Tabulka 20 Magnetické ztráty v zubech servomotoru 2:

Otáčky	Magnetická indukce	Měrné magnetické ztráty	Magnetické ztráty
	$B$	$p_{1Fej}$	$\Delta P_{1Fej}$
	[T]	$\left[ \frac{W}{kg} \right]$	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	1,30	0,49	0,2
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,30	7,72	2,7
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	1,29	21,29	7,6

Magnetické ztráty byly zadány do modelu v softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky internal heat generation.

### 6.2.3.3 Ztráty v guferu

Stejně jako u předchozího servomotoru byly ztráty v guferu stanoveny ze zkoušky naprázdno s guferem a bez gufera.



Obrázek 50 Zkouška naprázdno servomotoru 2

Odečtením ztráty získáme ztráty v guferu. V těchto ztrátách však není zohledněna teplota.

Tabulka 21 Ztráty v guferu servomotoru 2:

Otáčky	Ztráty s guferem	Ztráty bez gufera	Mechanické ztráty v guferu
	$\Delta P_{1SG}$	$\Delta P_{1BG}$	$\Delta P_{1G}$
	[W]	[W]	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	1,25	0,80	0,45
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	19,30	13,10	6,20
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	46,00	34,70	11,30

Pozn.: Ztráty pro 200ot · min<sup>-1</sup> byly zjištěny z proložení přímkou mezi 0ot · min<sup>-1</sup> a 250ot · min<sup>-1</sup>.

Ztráty v guferu byly zadány do modelu v softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky internal heat generation.

### 6.2.3.4 Ztráty v ložiscích

Ztráty jsou konfigurovány vždy pro návrhovou teplotu 100°C.

Tabulka 22 Ztráty v ložiscích servomotoru 2[15]:

Otáčky	Ztráty předního ložiska	Ztráty zadního ložiska
	$\Delta P_{1ZL}$	$\Delta P_{1ZL}$
	[W]	[W]
<b>200ot · min<sup>-1</sup></b>	0	0
<b>2000ot · min<sup>-1</sup></b>	1	2
<b>4000ot · min<sup>-1</sup></b>	3	3

Ztráty v ložiscích byly zadány do softwaru ANSYS pomocí okrajové podmínky heat flux.

#### 6.2.3.5 Chlazení motoru

Pro zadání konvekce je potřebné znát součinitel přestupu tepla a teplotu povrchu a teplotu okolí viz rovnice (14). Předpokládaná teplota povrchu byla 100°C a teplota okolí již zmíněných 25°C. Pro zadání radiace stačí emisivita a teplota okolí. Emisivita nerezové oceli je 0,16.

$$\begin{aligned}\alpha_k &= C_k \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \frac{1,315}{\sqrt[4]{D}} \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \\ &= \frac{1,315}{\sqrt[4]{8,5 \cdot 10^{-2}}} \cdot \sqrt[4]{100 - 25} = 7,17 \frac{W}{m^2 \cdot K}\end{aligned}\quad (48)$$

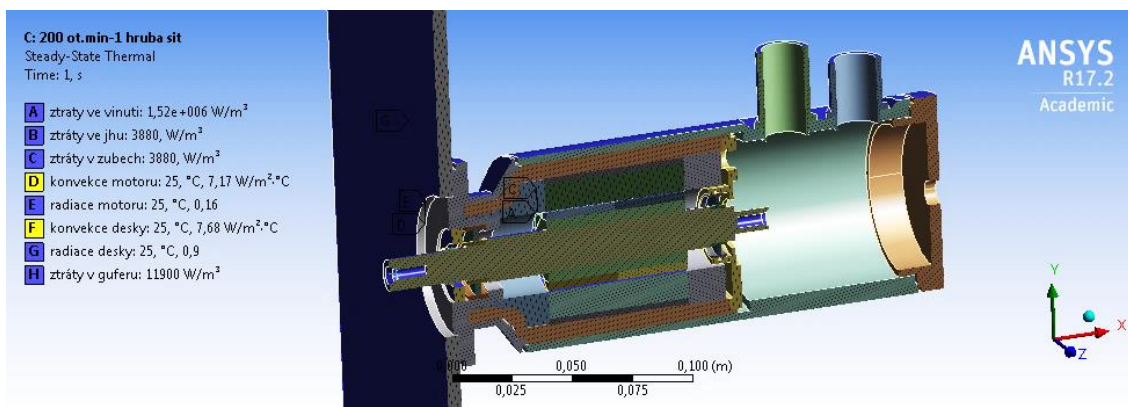
#### 6.2.3.6 Chlazení desky

Obdobným způsobem bylo zadáno chlazení desky. Předpokládaná teplota desky byla 50°C. Během numerických simulací však vždy vycházela teploty vyšší, a proto byla teplota pro součinitel přestupu tepla konvekcí změněna na 60°C. Emisivita chladicí desky je 0,9.

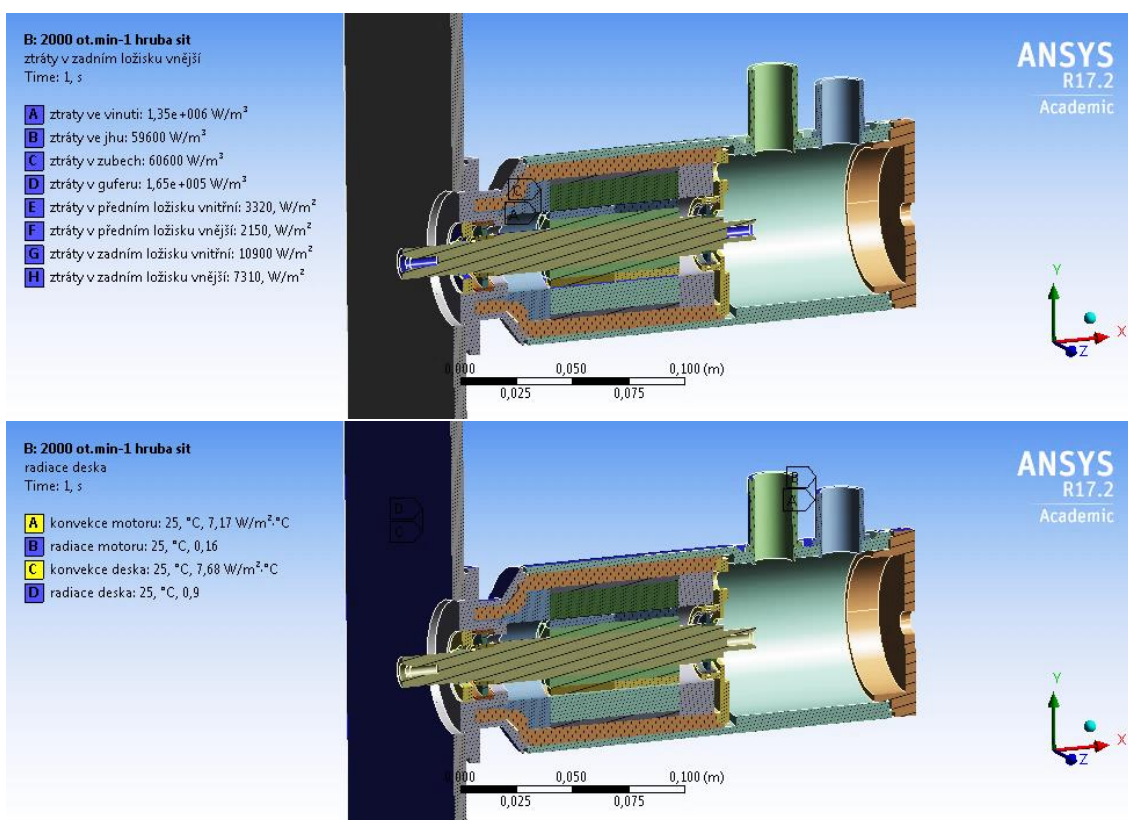
$$\begin{aligned}\alpha_k &= C_k \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \frac{1,365}{\sqrt[4]{H}} \cdot \sqrt[4]{T_w - T_\infty} = \\ &= \frac{1,365}{\sqrt[4]{0,254}} \cdot \sqrt[4]{60 - 25} = 4,68 \frac{W}{m^2 \cdot K}\end{aligned}\quad (49)$$

*Pozn.: Hodnotu konvekce na chladicí desce bylo nutné povýšit na  $7,68 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . Deska je dále chlazena směrem k šasi testovacího zařízení.*



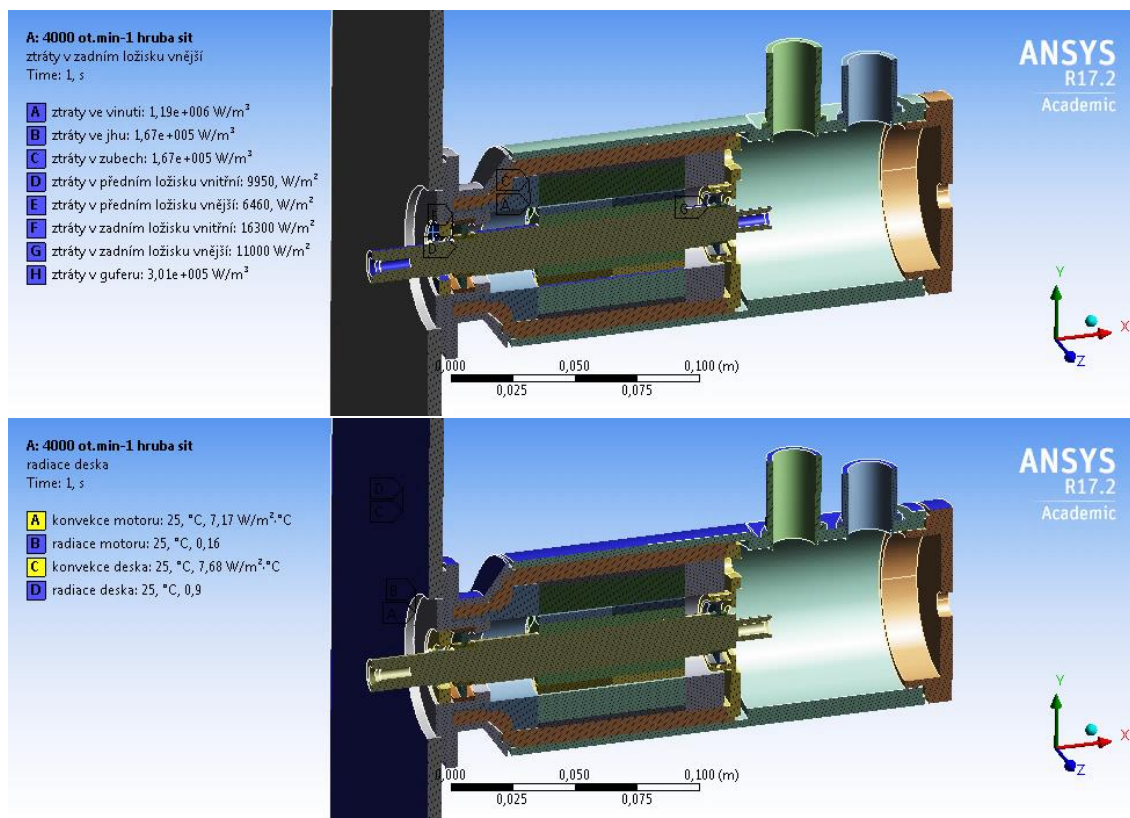


Obrázek 51 Okrajové podmínky pro 200 otáčkách za minutu servomotoru 2



Obrázek 52 Okrajové podmínky pro 2000 otáčkách za minutu servomotoru 2





Obrázek 53 Okrajové podmínky pro 4000 otáček za minutu servomotoru 2

Pozn.: Na obrázku se nepodařilo zobrazit všechny okrajové podmínky, nicméně zadané jsou všechny a žádná není potlačena.

#### 6.2.4 Dosažené výsledky

Jak bylo předesláno v kapitole 6.2.3 úloha byla spočtena pro dvě různé sítě, aby byla ověřena konvergence výsledků. Analýza konvergence je zachycena v tabulce 23, 24 a 25.

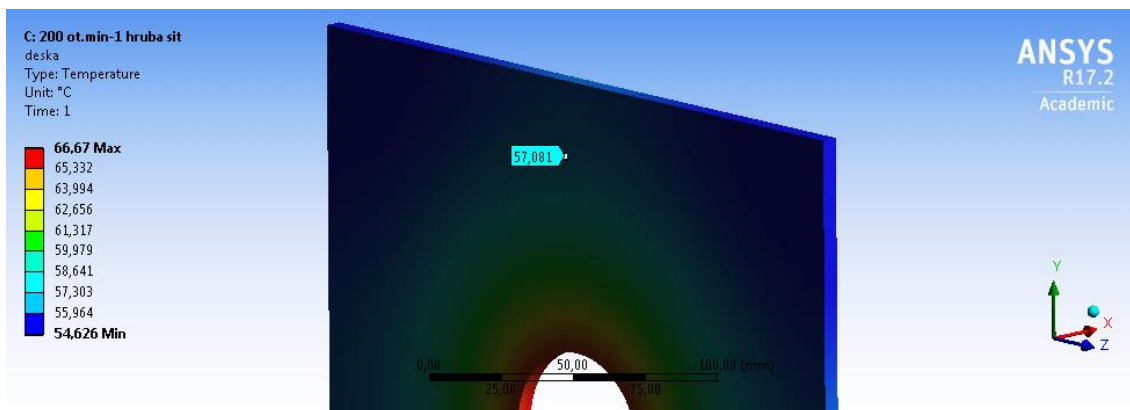
Hrubá síť obsahovala 172128 uzlů a 69203 prvků, a jemná síť 907705 uzlů a 440366 prvků, čímž byla ověřena konvergence výsledků.

Tabulka 23 Analýza konvergence sítě pro 200 otáček za minutu servomotoru 2:

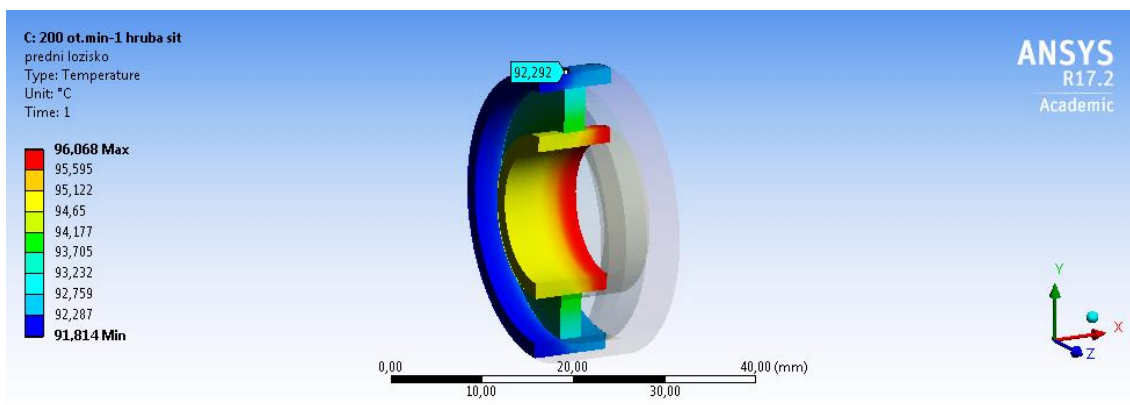
Místo	Hrubá síť	Jemná síť	Rozdíl
	[°C]	[°C]	[%]
Chladicí deska	57,1	56,9	0,4
Stator – přední ložisko	92,3	92,7	0,4
Stator – vinutí	125,1	128	2,3
Stator – zadní ložisko	112,5	113,4	0,8
Stator – povrch	103,5	104,2	0,7
Rotor – laminace	113,2	113,9	0,6
Součet ztrát konvekcí a radiací	94,0	94,0	0

Pozn.: Teplota byly zjištěny přes lokální souřadnicové systémy, takže jsou vždy ve stejném místě pro obě simulace.

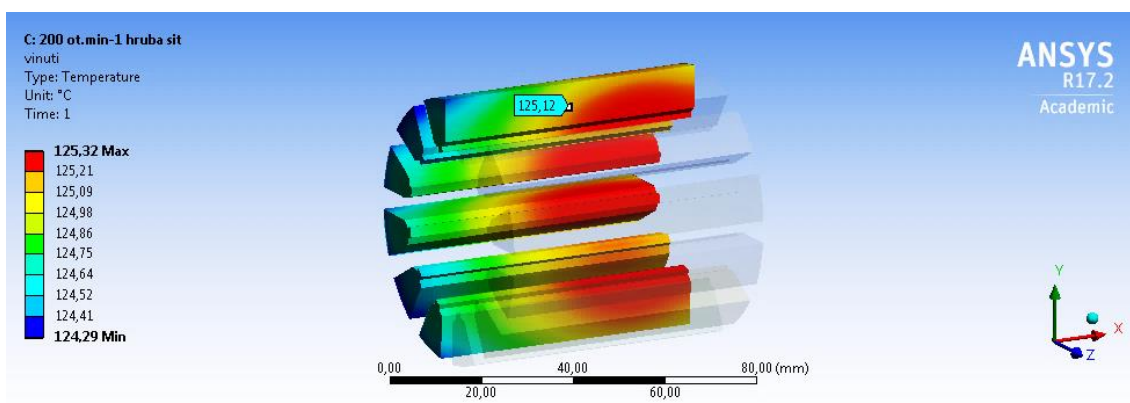
Vzhledem k tomu, že nenastal rozdíl výsledků větší, než 5%, lze považovat výsledky za konečné. Z výsledků je zřejmé, že hrubá síť postačuje pro analýzu.



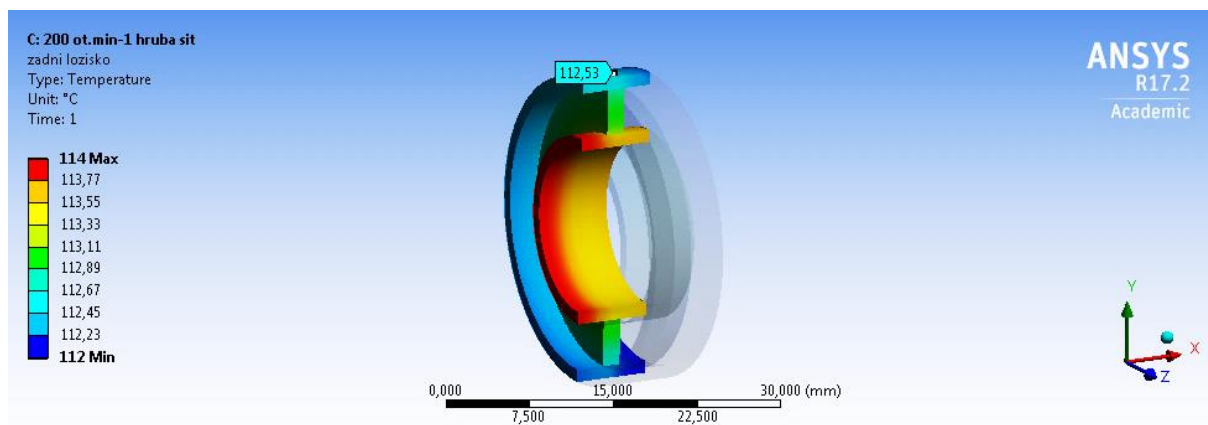
Obrázek 54 Teplota desky při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



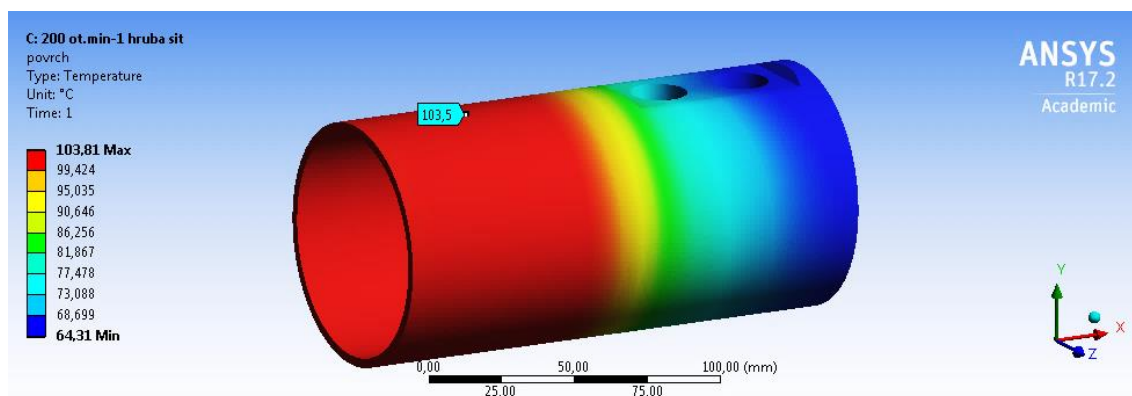
Obrázek 55 Teplota předního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



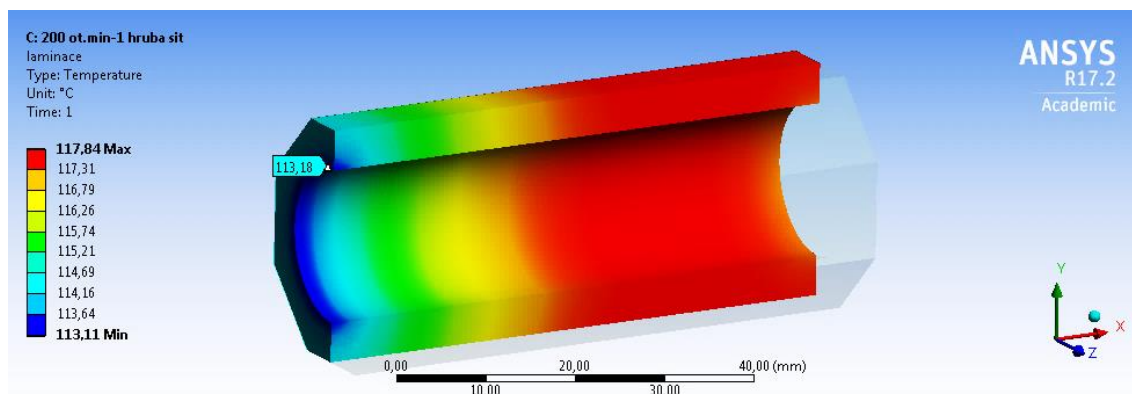
Obrázek 56 Teplota vinutí při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



Obrázek 57 Teplota zadního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



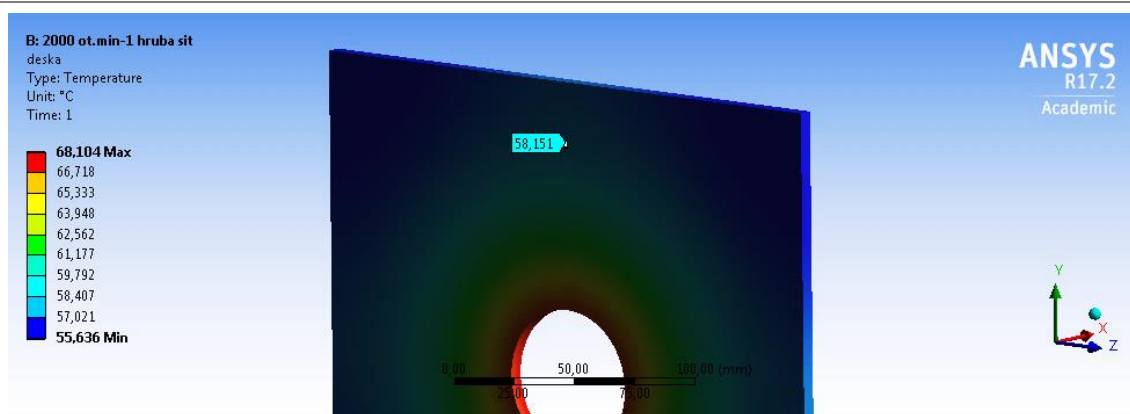
Obrázek 58 Teplota povrchu při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



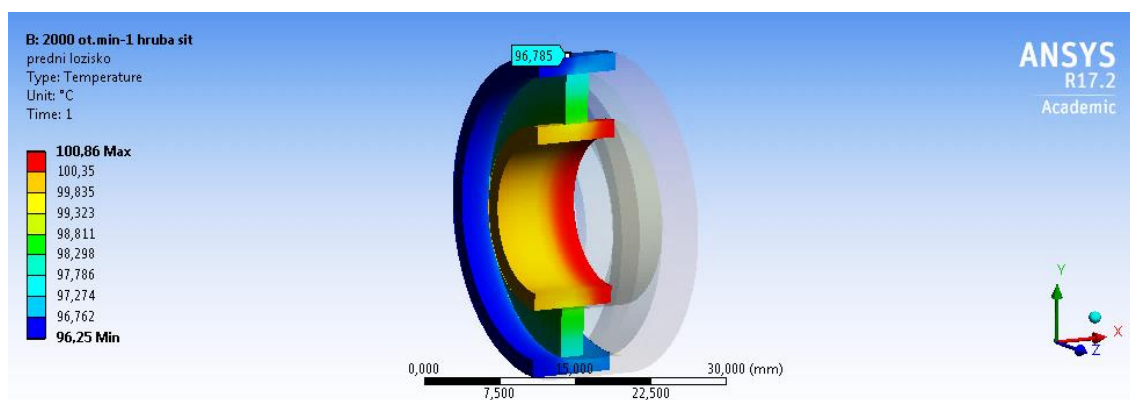
Obrázek 59 Teplota laminace při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2

Tabulka 24 Analýza konvergence sítě pro 2000 otáček za minutu servomotoru 2:

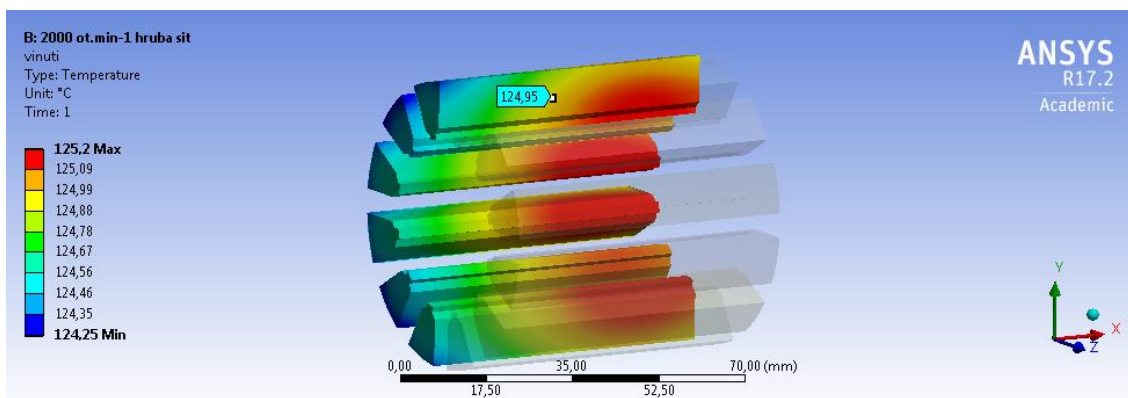
Místo	Hrubá síť	Jemná síť	Rozdíl
	[°C]	[°C]	[%]
Chladicí deska	58,2	57,9	0,5
Stator – přední ložisko	96,8	97,1	0,3
Stator – vinutí	125,0	127,7	2,1
Stator – zadní ložisko	118,7	119,2	0,4
Stator – povrch	104,4	105,3	0,9
Rotor – laminace	115,7	116,4	0,6
Součet ztrát konvekcí a radiací	96,7	96,7	0



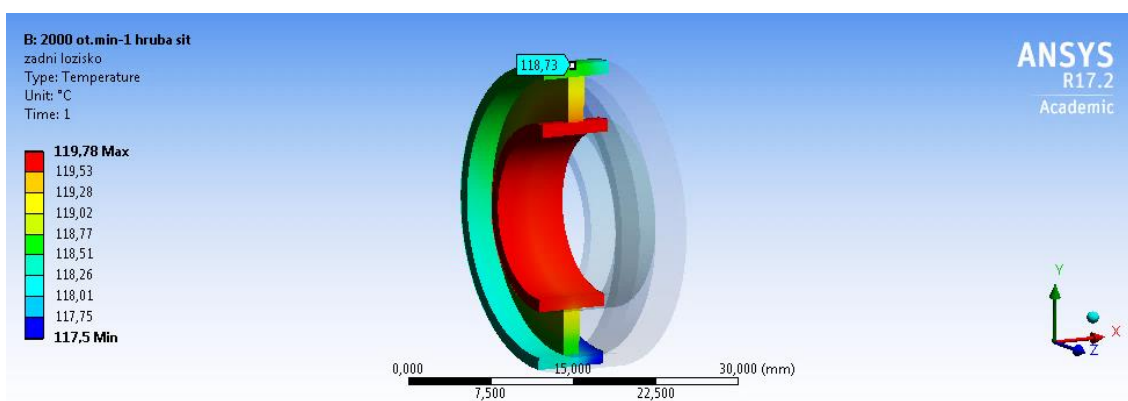
Obrázek 60 Teplota desky při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



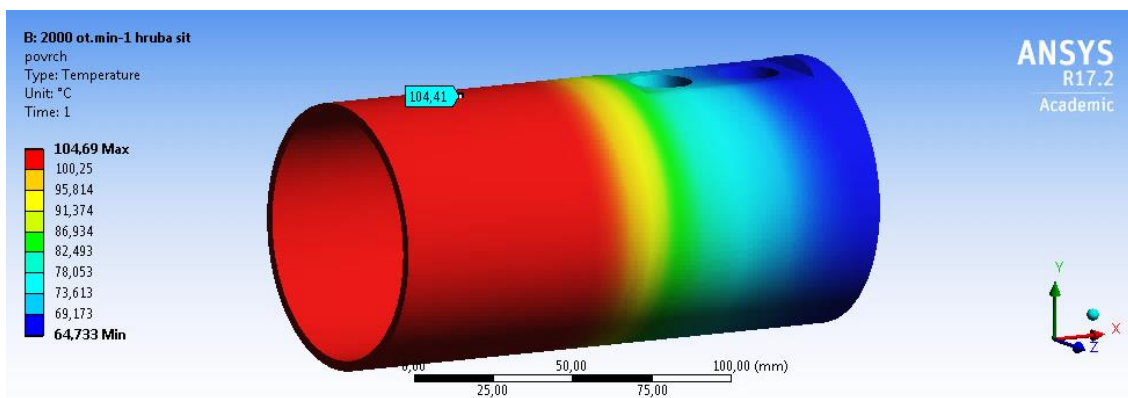
Obrázek 61 Teplota předního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



Obrázek 62 Teplota vinuti při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2

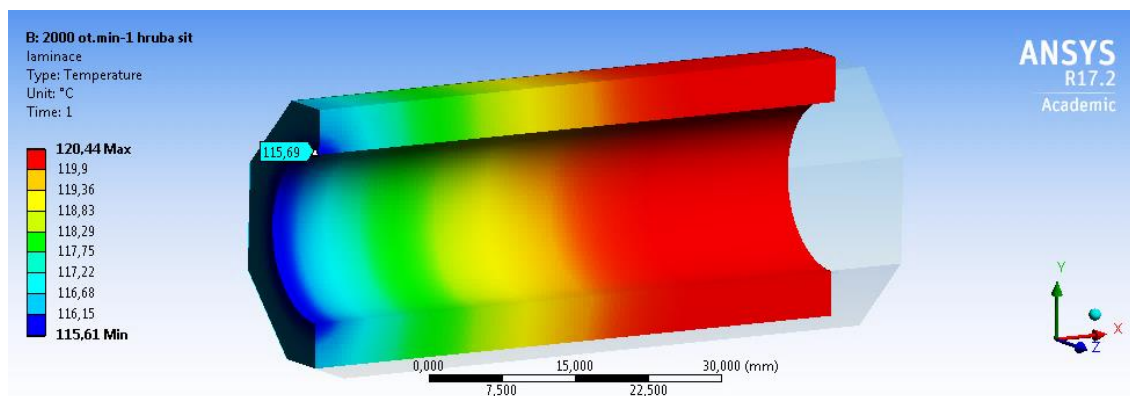


Obrázek 63 Teplota zadního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



Obrázek 64 Teplota povrchu při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2

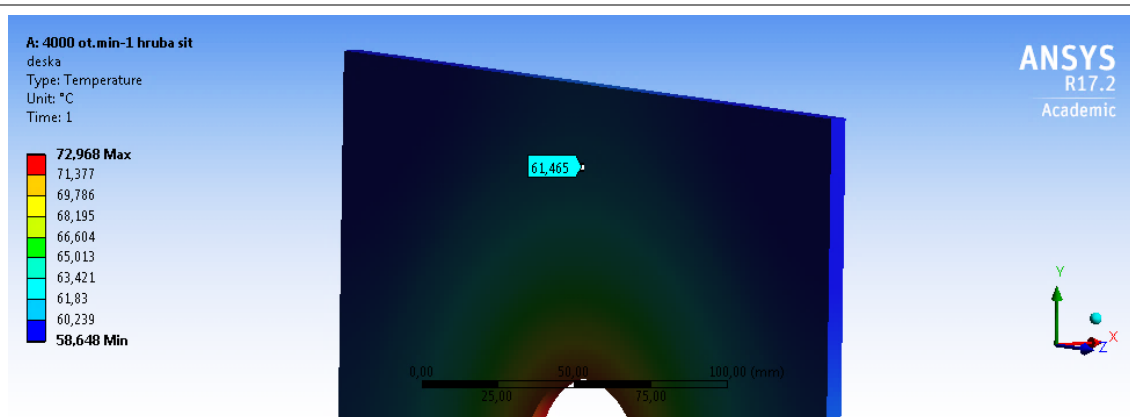




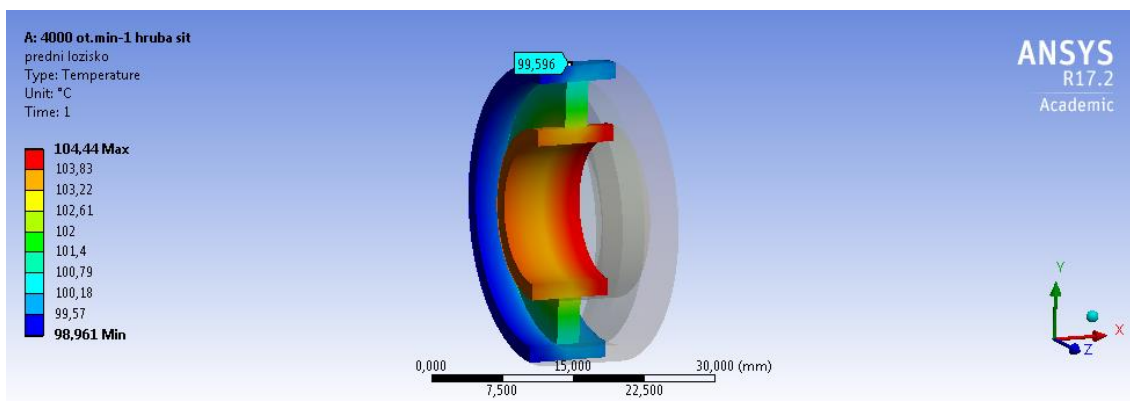
Obrázek 65 Teplota laminace při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2

Tabulka 25 Analýza konvergence sítě pro 4000 otáček za minutu servomotoru 2:

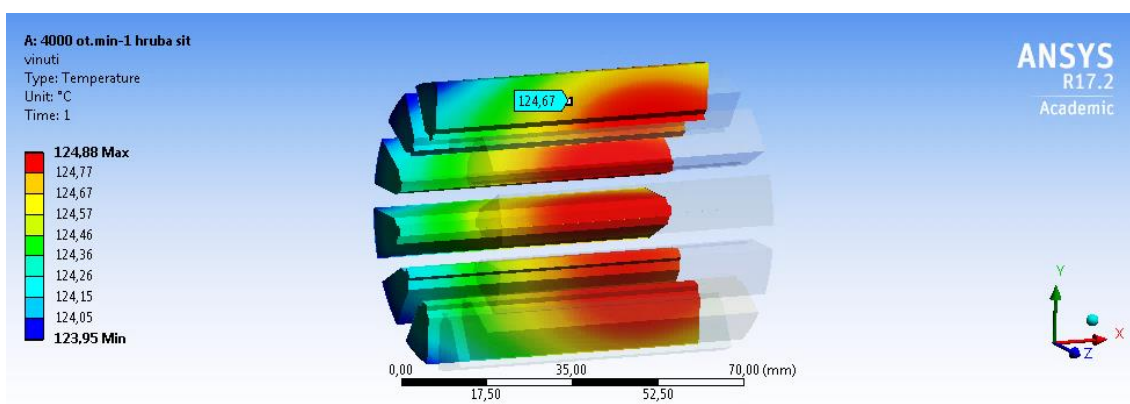
Místo	Hrubá síť	Jemná síť	Rozdíl
	[°C]	[°C]	[%]
Chladicí deska	61,5	61,2	0,5
Stator – přední ložisko	99,6	99,9	0,3
Stator – vinutí	124,7	127,1	1,9
Stator – zadní ložisko	121,6	122,3	0,6
Stator – povrch	104,4	105,2	0,8
Rotor – laminace	117,2	118,7	1,3
Součet ztrát konvekcí a radiací	103,3	103,3	0



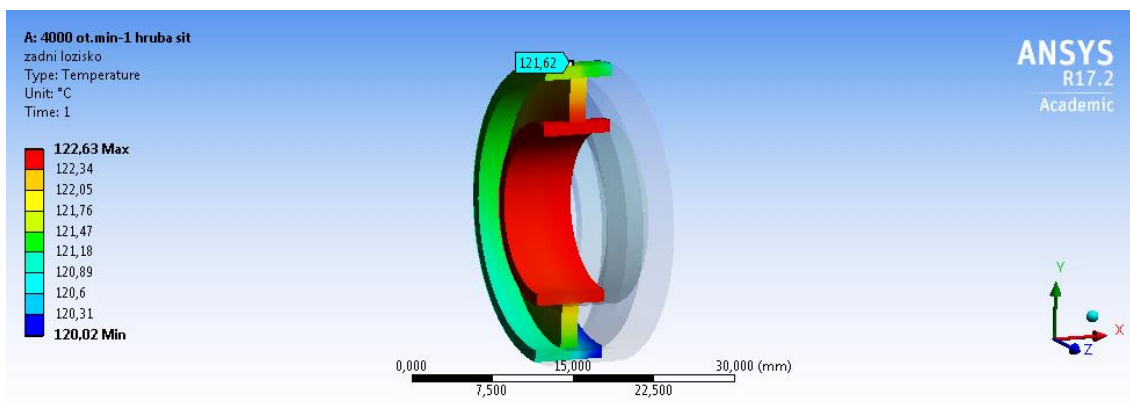
Obrázek 66 Teplota desky při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



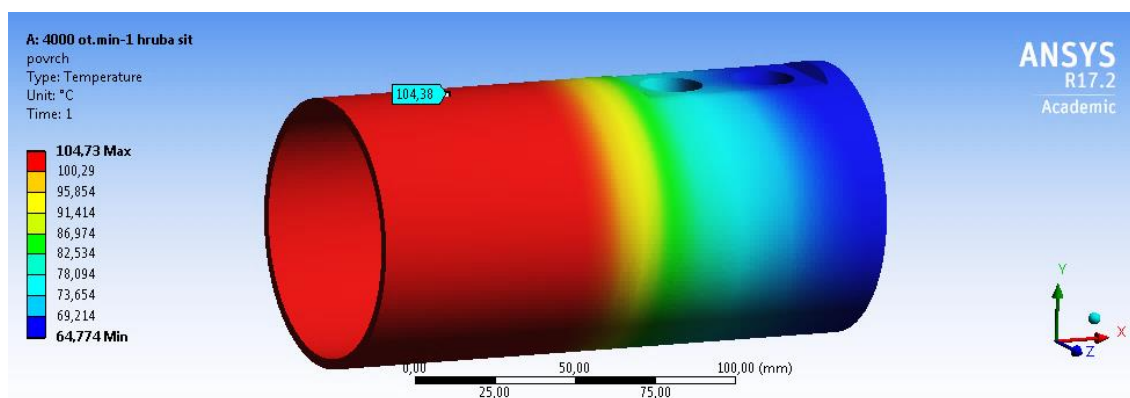
Obrázek 67 Teplota předního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



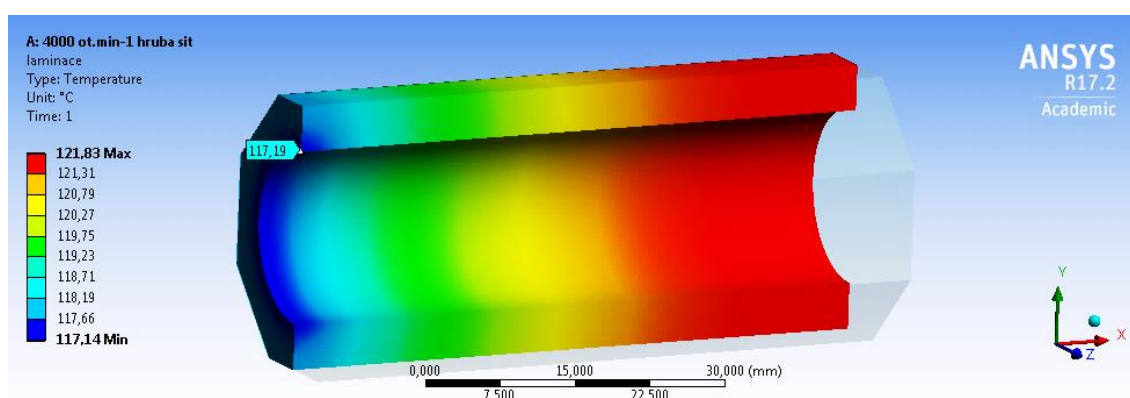
Obrázek 68 Teplota vinutí při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



Obrázek 69 Teplota zadního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



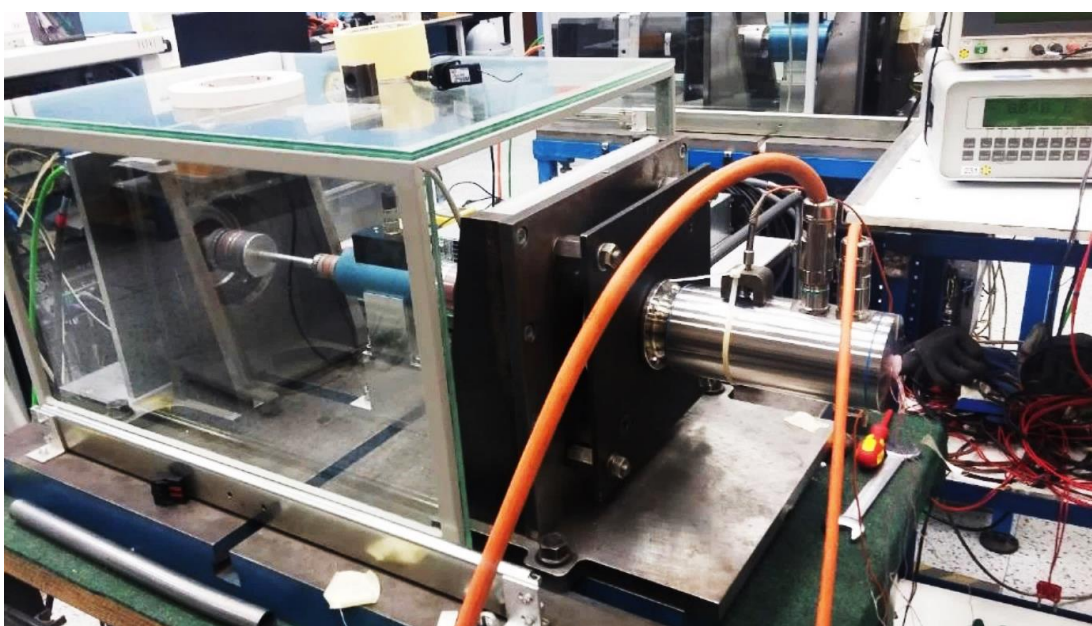
Obrázek 70 Teplota povrchu při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2



Obrázek 71 Teplota laminace při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2

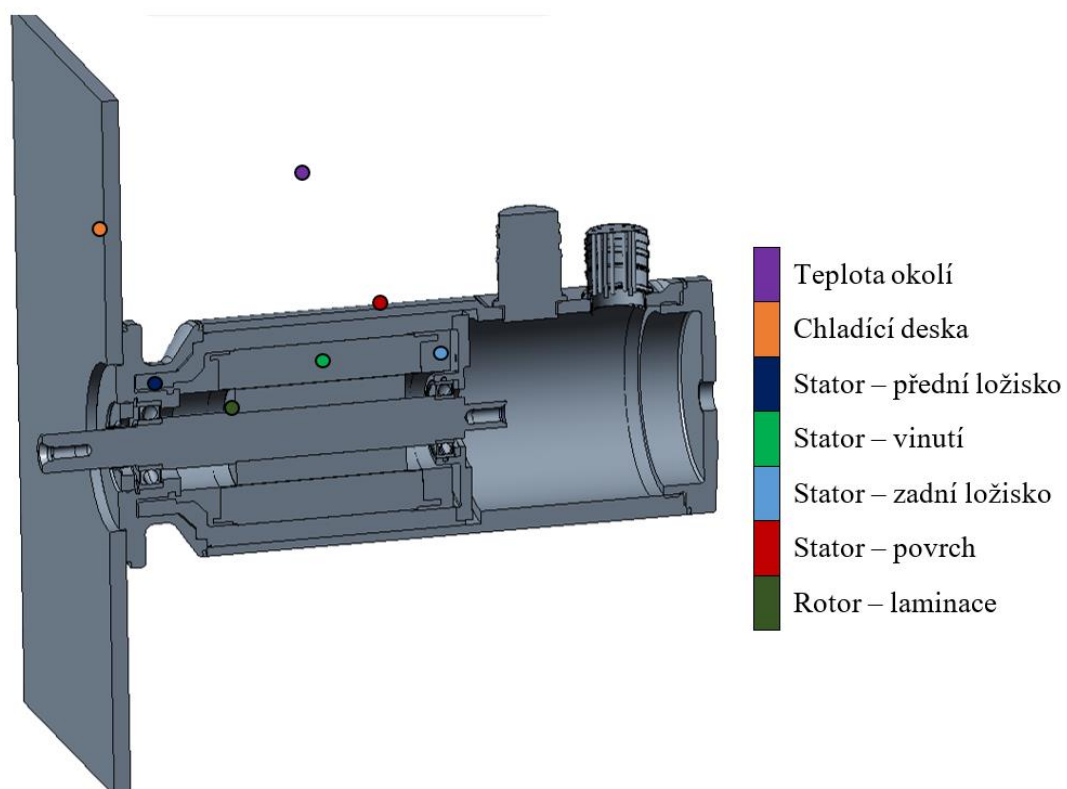
### 6.2.5 Verifikace výpočtu

Verifikace probíhala zkouškou oteplení motoru při zadaných otáčkách  $200 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $4000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Na motor bylo umístěno celkem 6 odporových snímačů teploty. Měřila se také teplota okolí a chladicí desky.

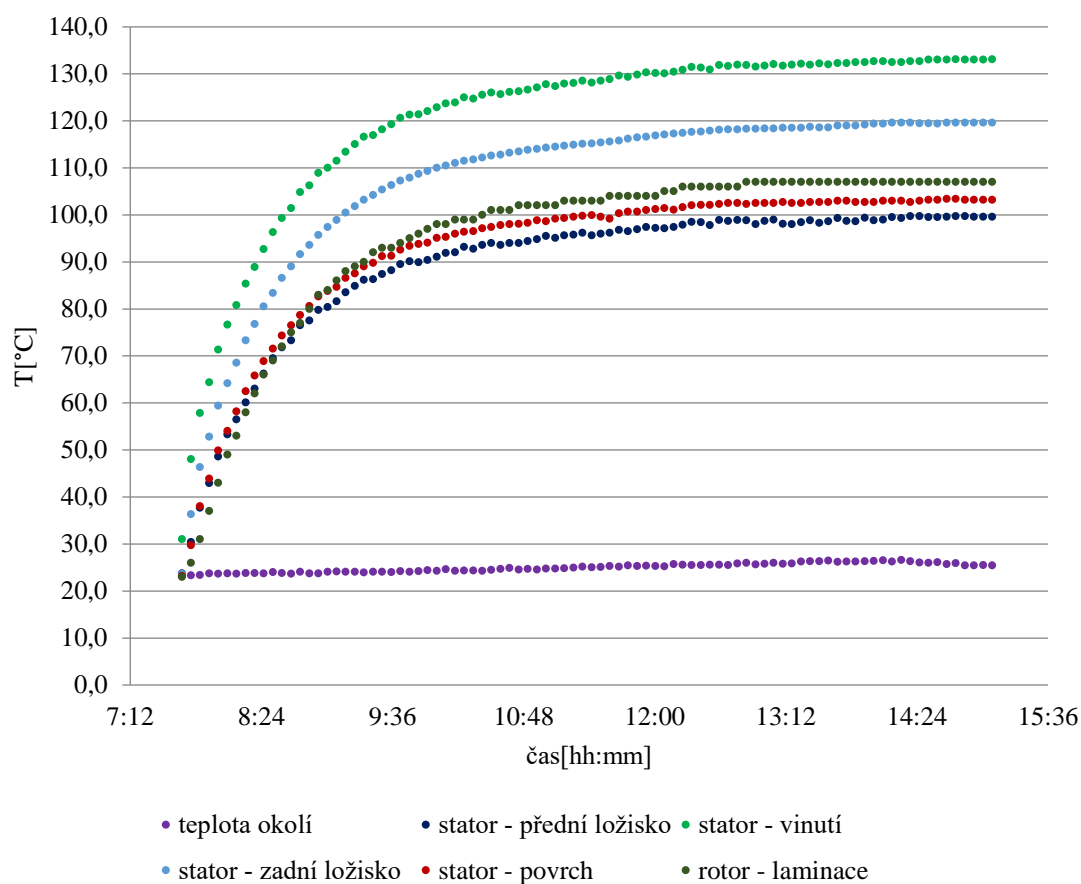


Obrázek 72 Dynamometr pro zkoušku oteplení servomotoru 2





Obrázek 73 Řez servomotorem 2 - body měření teploty

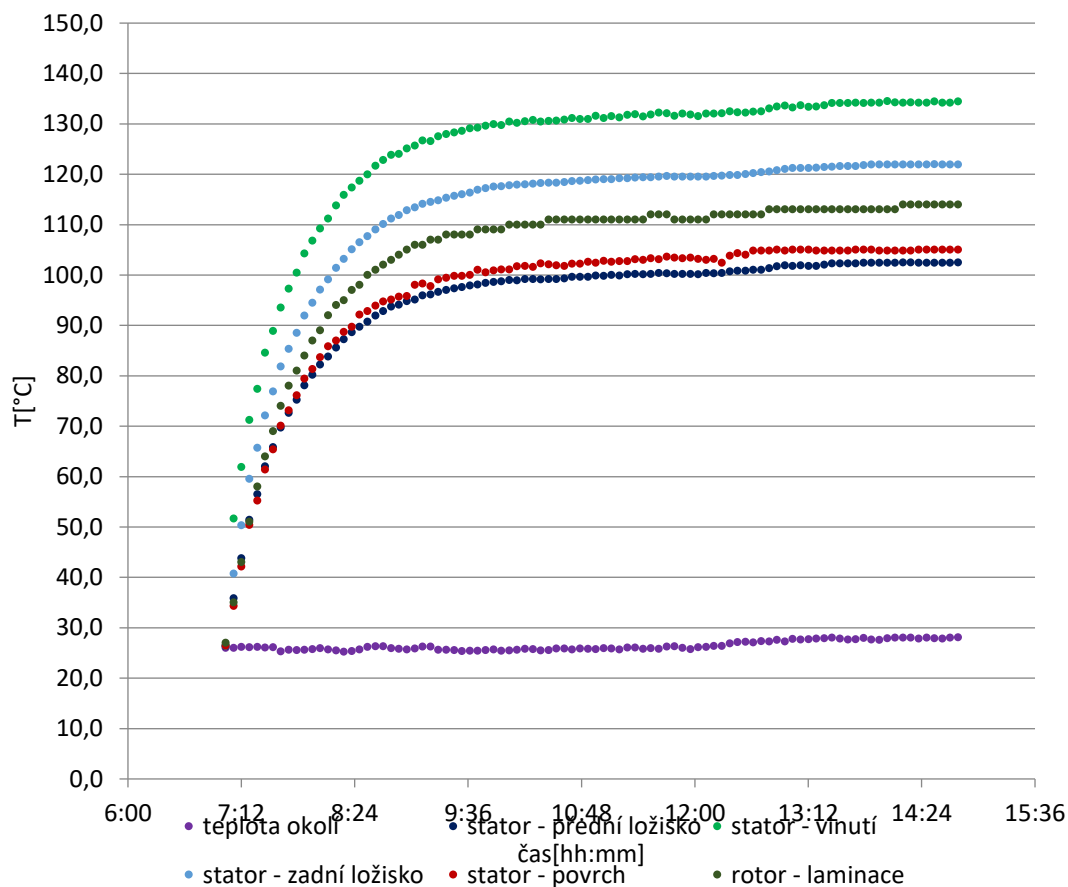


Obrázek 74 Zkouška oteplení servomotoru 2 pro zátěžný moment 1,80Nm při 200 otáčkách za minutu

Tabulka 26 Porovnání experimentu s výpočtem při 200 otáčkách za minutu servomotoru 2:

Místo	Experiment [°C]	MKP [°C]	Rozdíl [%]
	[°C]	[°C]	[%]
<b>Teplota okolí</b>	25,5	-	-
<b>Chladicí deska</b>	58,4	57,1	2,3
<b>Stator – přední ložisko</b>	99,6	92,3	7,9
<b>Stator – vinutí</b>	133,0	125,1	6,3
<b>Stator – zadní ložisko</b>	119,6	112,5	6,3
<b>Stator – povrch</b>	103,2	103,5	0,3
<b>Rotor – laminace</b>	107,0	113,2	5,4
<b>Celkové ztráty</b>	95,4	94,0	1,5

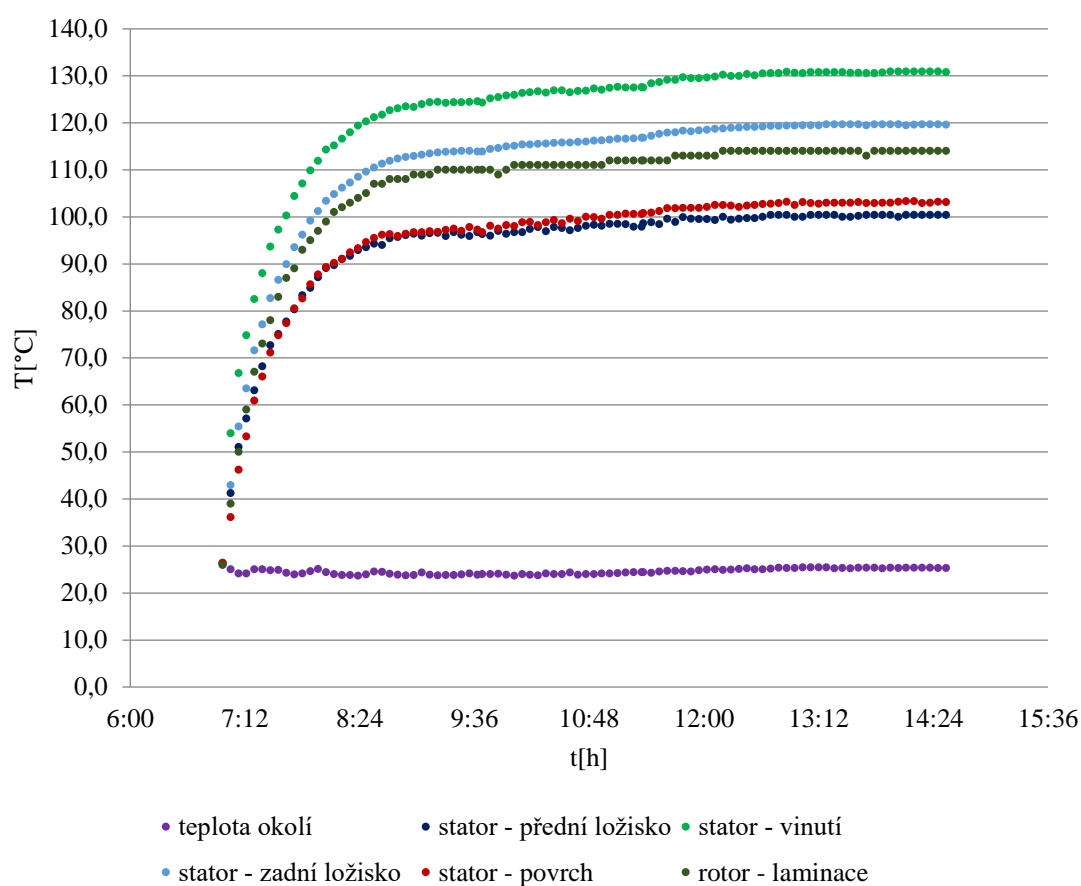
Pozn.: Teplota chladicí desky byla měřena dodatečně kontaktním snímačem teploty a není tedy součástí záznamu.



Obrázek 75 Zkouška oteplení servomotoru 2 pro zátěžný moment 1,68Nm při 2000 otáčkách za minutu

Tabulka 27 Porovnání experimentu s výpočtem při 2000 otáčkách za minutu servomotoru 2:

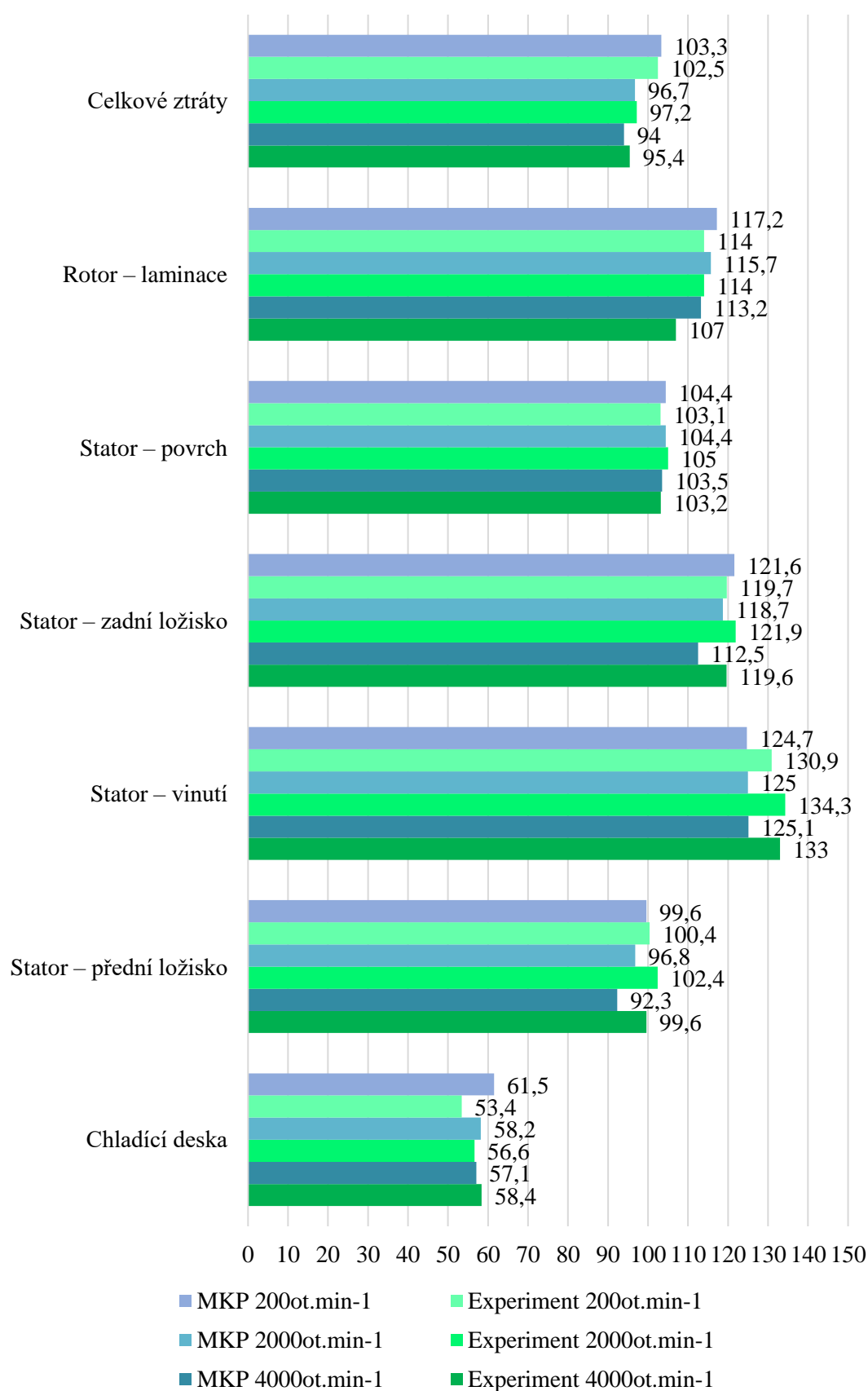
Místo	Experiment [°C]	MKP [°C]	Rozdíl [%]
	[°C]	[°C]	[%]
Teplota okolí	28,0	-	-
Chladicí deska	56,6	58,2	2,7
Stator – přední ložisko	102,4	96,8	5,8
Stator – vinutí	134,3	125,0	7,4
Stator – zadní ložisko	121,9	118,7	2,7
Stator – povrch	105,0	104,4	0,6
Rotor – laminace	114	115,7	1,5
Celkové ztráty	97,2	96,7	0,5



Obrázek 76 Zkouška oteplení servomotoru 2 pro zátěžný 1,55Nm při 4000 otáčkách za minutu

Tabulka 28 Porovnání experimentu s výpočtem při 4000 otáčkách za minutu servomotoru 2:

Místo	Experiment [°C]	MKP [°C]	Rozdíl [%]
	[°C]	[°C]	[%]
Teplota okolí	25,3	-	-
Chladicí deska	53,4	61,5	13,2
Stator – přední ložisko	100,4	99,6	0,8
Stator – vinutí	130,9	124,7	4,9
Stator – zadní ložisko	119,7	121,6	1,6
Stator – povrch	103,1	104,4	1,2
Rotor – laminace	114	117,2	2,7
Celkové ztráty	102,5	103,3	0,8



Obrázek 77 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 2

## 7 Závěr

V této diplomové práci byla provedena tepelná analýza servomotorů. Prvním cílem práce bylo vytvoření výpočtového modelu. Pro splnění tohoto cíle bylo nutné znát ztráty výkonu. Pro jejich zjištění bylo použito analytických vztahů a dílčích experimentů.

Výpočet je vždy nutné interpretovat s reálným měřením, proto byla součástí této práce také verifikace experimentem. Některé body měření vykazují poměrně značnou odchylku. U servomotoru 1 je to hlavně teplota chladicí desky. Ta se liší zejména v důsledku faktu, že chladicí deska je dále chlazená směrem k šasi testovacího zařízení. Tento fakt byl ve výpočtu chlazení desky zohledněn, avšak nedostatečně. Dále se může tato teplota lišit v důsledku zadání okrajových podmínek, konkrétně ztrát v guferu. Ztráty bylo nutné zadávat podmínkou internal heat generation, nikoliv heat flux, což by mělo způsobit vyšší teplotu rotoru. To bylo zohledněno v kontaktních tepelných vodivostech, resp. vyšší odvodem tepla směrem k chladicí desce. V důsledku tohoto faktu má chladicí deska vyšší teplotu. Důležité je zmínit, že návrhová teplota desky pro výpočet chlazení se lišila, od experimentální teploty. U servomotoru 2 se liší teplota ložisek. Tato odchylka mohla nastat v důsledku nepřesné polohy termočlánků. Na výrobu servomotoru 1 jsem dohlížel a osobně jsem termočlánky umisťoval do motoru. U servomotoru 2 jsem tato možnost nebyla.

Závěrečným bodem práce je porovnání těchto dvou motorů. Servomotor 2 má lepší odvod tepla směrem k chladicí desce. Na druhé straně rotorová část dosahuje vyšších teplot, což může vést ke snížení životnosti celého motoru. Na ostatních komponentech, včetně teploty povrchu motoru vykazují oba motory shodnou teplotu.

Pro budoucí rozšíření práce přichází v úvahu tepelná optimalizace.

## 8 Seznam použitých zdrojů:

- [1] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony 2*. 2. vydání Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4.
- [2] Kollmorgen AKM servomotor: Selection guide [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/servo/akm-series/akm-series-ac-synchronous-motors/ac-synchronous-servo-motors/>
- [3] Kollmorgen AKMH stainless steel: washdown motor Selection guide [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.kollmorgen.com/en-us/products/motors/servo/akmh-series/stainless-steel-akmh-series/>
- [4] ONDRUŠKA, Emil a Antonín MALOUŠEK. *Ventilace a chlazení elektrických točivých strojů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1985.
- [5] CENGEL, Yunus, John Cimbala a John CIMBALA. *Fundamentals of thermal fluid sciences*. 3. vydání. Austrálie a Nový Zéland: McGraw-Hill Education, 2008.
- [6] JANDA, Marcel a Hana KUCHYŇKOVÁ. *Teplotní měření v elektrických strojích* [online]. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, FEKT VUT v Brně, 2009 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/65/teplotni-mereni-v-elektrickych-strojich/>
- [7] *Thermal Energy Transfer: Conduction, Convection, Radiation* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://schoolworkhelper.net/thermal-energy-transfer-conduction-convection-radiation/>
- [8] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [9] *Základní principy DPZ* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://copernicus.gov.cz/zakladni-informace-a-princip-dpz>
- [10] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. vydání. Praha: Československá akademie věd, 1982.
- [11] *Overview of Core Loss Calculation Techniques* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://web.eecs.utk.edu/~dcostine/ECE482/Spring2015/materials/magnetics/CoreLossTechniques.pdf>
- [12] JANDA, Marcel. *Laboratoře elektrických strojů: Měření teploty v elektrických strojích*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- [13] PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2011.
- [14] ANSYS® Academic Research, Release 17.2: Help System, Thermal analyses guide [online]. Ansys [cit. 2017-05-26].

- [15] SKF. *Bearing calculator* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z:  
<http://webtools3.skf.com/BearingCalc/>



## 9 Seznam použitých symbolů a zkratk:

Symbol	Rozměr	Veličina
$a$	$[-]$	Exponent hysterezních ztrát
$b$	$[-]$	Exponent hysterezních ztrát
$B$	$[T]$	Magnetická indukce
$C$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita
$c$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Měrná tepelná kapacita
$C_e$	$[-]$	Koeficient pro ztráty vířivými proudy
$C_h$	$[-]$	Koeficient pro hysterezní ztráty
$C_k$	$[-]$	Součinitel tvaru
$C_p$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita za konstantního tlaku
$C_v$	$\left[\frac{J}{K}\right]$	Tepelná kapacita za konstantního objemu
$E_{ak}$	$[J]$	Akumulace
$\dot{E}_{ak}$	$[W]$	Akumulace
$E_g$	$[J]$	Generovaná energie
$\dot{E}_g$	$[W]$	Tok generované energie
$E_{in}$	$[J]$	Energie vstupující do Kontrolního objemu
$\dot{E}_{in}$	$[W]$	Tok energie vstupující do Kontrolního objemu
$E_{out}$	$[J]$	Energie vystupující z Kontrolního objemu
$\dot{E}_{out}$	$[W]$	Tok energie vystupující z Kontrolního objemu
$E_0$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Zářivost černého tělesa
$E_\lambda$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Monochromatická zářivost nečerného tělesa
$E_{0,\lambda}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Monochromatická zářivost černého tělesa
$f$	$[Hz]$	Frekvence elektromagnetického pole
$I_{ef}$	$[A]$	Efektivní hodnota proudu

$K$	$\left[\frac{W}{K}\right]$	Matice materiálových konstant nebo funkce teploty (zahrnuje tepelnou vodivost)
$L$	$[m]$	Délka
$m$	$[kg]$	Hmotnost
$n$	$\left[\frac{ot}{min^{-1}}\right]$	Otáčky elektromagnetického pole
$Nu$	$[-]$	Nusselovo číslo
$P$	$[J]$	Potenciál vnějšího zatížení
$p$	$[-]$	Počet pólových dvojic
$\Delta P_{Cu}$	$[W]$	Ztráty ve vinutí
$\Delta p_{Fe}$	$\left[\frac{W}{kg}\right]$	Měrné magnetické ztráty
$Q$	$[J]$	Přeměněné teplo
$\dot{Q}$	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Průtok chladiva
$\dot{Q}$	$[W]$	Tepelný tok
$\dot{q}$	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	Měrný tepelný tok
$\partial Q$	$[J]$	Elementární změna tepla
$Q_1$	$[J]$	Teplo odevzdané chladiči
$Q_2$	$[J]$	Teplo přijaté od ohříváče
$R$	$\left[\frac{J}{mol \cdot K}\right]$	Univerzální plynová konstanta
$R_\lambda$	$\left[\frac{K}{W}\right]$	Odpor proti vedení tepla (reciproká hodnota tepelné vodivosti)
$R_a$	$[\Omega]$	Odpor vinutí
$R_0$	$[\Omega]$	Odpor vinutí při teplotě $T_a$
$r_1$	$[m]$	Vnitřní poloměr válcové stěny
$r_2$	$[m]$	Vnější poloměr válcové stěny
$S$	$[m^2]$	Plocha
$T$	$[K]$	Teplota
$T_C$	$[^\circ C]$	Teplota ve stupních Celsia

$T_F$	[°F]	Teplota ve stupních Fahrenheita
$T_K$	[K]	Teplota v Kelvinech
$T_w$	[K]	Teplota na povrchu tělesa
$T_\infty$	[K]	Teplota okolí
$T_1$	[K]	Teplota chladiče
$T_2$	[K]	Teplota ohřívače
$\Delta T$	[K]	Rozdíl teplot
$gradT$	$\left[\frac{K}{m}\right]$	Teplotní gradient
$\frac{\delta T}{\delta x}; \frac{\delta T}{\delta y}; \frac{\delta T}{\delta z}$	$\left[\frac{K}{m}\right]$	Teplotní gradient
$\Delta T$	[K]	Teplotní rozdíl mezi
$\partial T$	[K]	Elementární změna teploty
$W$	[J]	Energie napjatosti
$\alpha$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	Součinitel přestupu tepla
$\alpha_k$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	Součinitel přestupu tepla konvekcí
$\sigma$	$\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$	Stefan-Boltzmannova konstanta
$\delta$	[m]	Tloušťka mezi vrstvami
$\varepsilon_0$	$\left[\frac{\Omega}{K}\right]$	Teplotní součinitel elektrického odporu
$\varepsilon_\lambda$	[–]	Monochromatická poměrná zářivost (emisivita)
$\kappa$	[–]	Poissonova konstanta
$\lambda$	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	Tepelná vodivost
$\eta$	[–]	Účinnost Carnotova cyklu
$\Pi$	[J]	Celková potenciální energie
$\rho$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Hustota chladiva

Zkratka	Význam
<b><i>MKP</i></b>	Metoda konečných prvků
<b><i>LPS</i></b>	Lumped parameters system
<b><i>CAD</i></b>	Computer aided design

## 10 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 Konstrukce synchronního servomotoru s permanentními magnety [2] .....	17
Obrázek 2 Servomotor 1 .....	18
Obrázek 3 Servomotor 2 [3] .....	18
Obrázek 4 Rozdělení odvodu tepla elektromotoru [4].....	19
Obrázek 5 Přenos tepla [7].....	23
Obrázek 6 Energie kontrolního objemu [8] .....	23
Obrázek 7 Jednorozměrné vedení tepla [8] .....	26
Obrázek 8 Obtékání obecného tělesa tekutinou [8] .....	27
Obrázek 9 Rozsah vlnových délek elektromagnetického záření. [9].....	29
Obrázek 10 Kontaktní tepelná vodivost [5].....	34
Obrázek 11 Tok výkonu elektromotoru [9] .....	36
Obrázek 12 Schéma řešení pomocí metody LPS .....	38
Obrázek 13 Zjednodušení geometrie – hřidel servomotoru 1.....	42
Obrázek 14 Zjednodušení geometrie – řez modelem servomotoru 1 .....	42
Obrázek 15 Hrubá síť (vlevo) a jemná síť (vpravo) .....	44
Obrázek 16 Zkouška naprázdno servomotoru 1 .....	46
Obrázek 17 Okrajové podmínky pro 200 otáček za minutu servomotoru 1 .....	48
Obrázek 18 Okrajové podmínky pro 2000 otáček za minutu servomotoru 1 .....	49
Obrázek 19 Okrajové podmínky pro 4000 otáček za minutu servomotoru 1 .....	49
Obrázek 20 Teplota desky při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 .....	50
Obrázek 21 Teplota předního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření na statorové části servomotoru 1 .....	51
Obrázek 22 Teplota vinutí při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 .....	51
Obrázek 23 Teplota zadního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 .....	51
Obrázek 24 Teplota povrchu při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ..	52
Obrázek 25 Teplota předního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření na rotorové části servomotoru 1 .....	52
Obrázek 26 Teplota laminace při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ..	52
Obrázek 27 Teplota desky při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ....	53
Obrázek 28 Teplota předního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření na statorové části servomotoru 1 .....	53
Obrázek 29 Teplota vinutí při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ....	54
Obrázek 30 Teplota zadního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 .....	54
Obrázek 31 Teplota povrchu při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ..	54

Obrázek 32 Teplota předního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření na rotorové části servomotoru 1 .....	55
Obrázek 33 Teplota laminace při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 .....	55
Obrázek 34 Teplota desky při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ....	56
Obrázek 35 Teplota předního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření na statorové části servomotoru 1 .....	56
Obrázek 36 Teplota vinutí při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ....	56
Obrázek 37 Teplota zadního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 .....	57
Obrázek 38 Teplota povrchu při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 1 ..	57
Obrázek 39 Teplota předního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření na rotorové části servomotoru 1 .....	57
Obrázek 40 Teplota laminace při 4000 otáček za minutu v místě měření servomotoru 1 ..	58
Obrázek 41 Dynamometr pro zkoušku oteplení servomotoru 1 .....	58
Obrázek 42 Montáž termočlánků pro snímání teploty vinutí a předního ložiska před zalitím epoxidem (vlevo) a zadního ložiska (vpravo) (umístění termočlánků je vyznačeno modrou barvou) .....	59
Obrázek 43 Řez servomotorem 1 - body měření teploty .....	59
Obrázek 44 Zkouška oteplení servomotoru 1 pro zátěžný moment 1,40Nm při 200 otáčkách za minutu.....	60
Obrázek 45 Zkouška oteplení servomotoru 1 pro zátěžný moment 1,22Nm při 2000 otáčkách za minutu.....	61
Obrázek 46 Zkouška oteplení servomotoru 1 pro zátěžný moment 1,00Nm při 4000 otáčkách za minutu.....	62
Obrázek 47 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1 .....	63
Obrázek 48 Zjednodušení geometrie – řez modelem servomotoru 2 .....	64
Obrázek 49 Hrubá síť (vlevo) a jemná síť (vpravo) .....	65
Obrázek 50 Zkouška naprázdno servomotoru 2 .....	67
Obrázek 51 Okrajové podmínky pro 200 otáčkách za minutu servomotoru 2 .....	69
Obrázek 52 Okrajové podmínky pro 2000 otáčkách za minutu servomotoru 2 .....	69
Obrázek 53 Okrajové podmínky pro 4000 otáčkách za minutu servomotoru 2 .....	70
Obrázek 54 Teplota desky při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2 .....	71
Obrázek 55 Teplota předního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2 .....	71
Obrázek 56 Teplota vinutí při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2 .....	71
Obrázek 57 Teplota zadního ložiska při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2 .....	72
Obrázek 58 Teplota povrchu při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2 ..	72

Obrázek 59 Teplota laminace při 200 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	72
Obrázek 60 Teplota desky při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	73
Obrázek 61 Teplota předního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	73
Obrázek 62 Teplota vinutí při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	74
Obrázek 63 Teplota zadního ložiska při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	74
Obrázek 64 Teplota povrchu při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	74
Obrázek 65 Teplota laminace při 2000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	75
Obrázek 66 Teplota desky při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	75
Obrázek 67 Teplota předního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	76
Obrázek 68 Teplota vinutí při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	76
Obrázek 69 Teplota zadního ložiska při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	76
Obrázek 70 Teplota povrchu při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	77
Obrázek 71 Teplota laminace při 4000 otáčkách za minutu v místě měření servomotoru 2	77
Obrázek 72 Dynamometr pro zkoušku oteplení servomotoru 2	77
Obrázek 73 Řez servomotorem 2 - body měření teploty	78
Obrázek 74 Zkouška oteplení servomotoru 2 pro zátěžný moment 1,80Nm při 200 otáčkách za minutu	79
Obrázek 75 Zkouška oteplení servomotoru 2 pro zátěžný moment 1,68Nm při 2000 otáčkách za minutu	80
Obrázek 76 Zkouška oteplení servomotoru 2 pro zátěžný 1,55Nm při 4000 otáčkách za minutu	81
Obrázek 77 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 2	82
Tabulka 1 Součinitel tvaru [5]:	28
Tabulka 2 Kontaktní tepelná vodivost dvou stejných materiálů [5]:	35
Tabulka 3 Kontaktní tepelná vodivost dvou odlišných materiálů [5]:	35
Tabulka 4 Přehled prvků pro tepelnou analýzu. [14]:	39
Tabulka 5 Tepelné vodivosti použitých materiálů u servomotoru 1:	43
Tabulka 6 Ztráty ve vinutí servomotoru 1:	44
Tabulka 7 Magnetické ztráty ve jhu servomotoru 1:	45
Tabulka 8 Magnetické ztráty v zubech servomotoru 1:	46
Tabulka 9 Ztráty v guferu servomotoru 1:	47

---

Tabulka 10 Ztráty v ložiscích servomotoru 1 [15]: .....	47
Tabulka 11 Analýza konvergence sítě pro 200 otáček za minutu servomotoru 1: .....	50
Tabulka 12 Analýza konvergence sítě pro 2000 otáček za minutu servomotoru 1: .....	53
Tabulka 13 Analýza konvergence sítě pro 4000 otáček za minutu servomotoru 1: .....	55
Tabulka 14 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1 při 200 otáčkách za minutu: .....	60
Tabulka 15 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1 při 2000 otáčkách za minutu: .....	61
Tabulka 16 Porovnání experimentu s výpočtem servomotoru 1 při 4000 otáčkách za minutu: .....	62
Tabulka 17 Tepelné vodivosti použitých materiálů servomotoru 2: .....	64
Tabulka 18 Ztráty ve vinutí servomotoru 2: .....	65
Tabulka 19 Magnetické ztráty ve jhu servomotoru 2: .....	66
Tabulka 20 Magnetické ztráty v zubech servomotoru 2: .....	66
Tabulka 21 Ztráty v guferu servomotoru 2: .....	67
Tabulka 22 Ztráty v ložiscích servomotoru 2[15]: .....	68
Tabulka 23 Analýza konvergence sítě pro 200 otáček za minutu servomotoru 2: .....	70
Tabulka 24 Analýza konvergence sítě pro 2000 otáček za minutu servomotoru 2: .....	73
Tabulka 25 Analýza konvergence sítě pro 4000 otáček za minutu servomotoru 2: .....	75
Tabulka 26 Porovnání experimentu s výpočtem při 200 otáčkách za minutu servomotoru 2: .....	79
Tabulka 27 Porovnání experimentu s výpočtem při 2000 otáčkách za minutu servomotoru 2: .....	80
Tabulka 28 Porovnání experimentu s výpočtem při 4000 otáčkách za minutu servomotoru 2: .....	81